Vanda Palubinskienė

# Fizika

## Vadovėlis XI–XII klasei

Suaugusiųjų ir savarankiškam mokymuisi

ANTROJI KNYGA

ŠVIESA
60 METŲ

Vanda Palubinskienė



# Fizika

## Vadovėlis XI–XII klasei

**Suaugusiųjų ir savarankiškam mokymuisi**

**ANTROJI KNYGA**



ŠVIESA KAUNAS
60 METŲ

UDK 53(075.3)
Pa156

Redaktorė ELVYRA ŽURAUSKIENĖ

*Lietuvos Respublikos švietimo ir mokslo ministerijos rekomenduota 2005 04 20, Nr. 70*

Vadovėlis atitinka kalbos taisyklingumo reikalavimus

Pirmasis leidimas 2005

ISBN 5-430-04043-6

# TURINYS

## ELEKTRODINAMIKOS PAGRINDAI



## OPTIKA

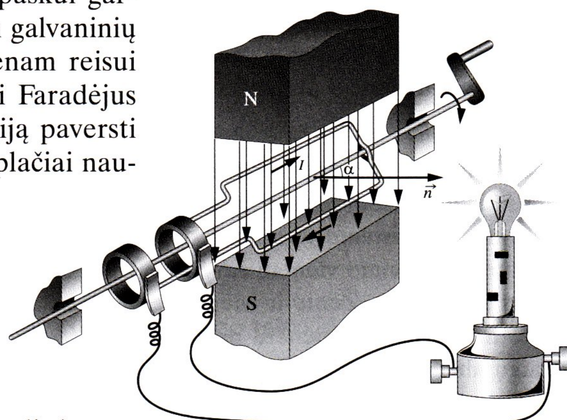
# ELEKTRODINAMIKOS PAGRINDAI

## 14 SKYRIUS. KINTAMOJI ELEKTROS SROVĖ

### 96. Kintamosios elektros srovės gavimas

XIX a. pradžioje jau buvo išrasti palyginti galingi mechaninės energijos šaltiniai – garo mašina, garo turbina, tobulėjo vidaus degimo variklis. Tuo tarpu elektra buvo gaunama tik primityviausiu cheminiu būdu. Pavyzdžiui, kai rusų inžinierius ir išradėjas P. Jabločkovas (1847–1894) pagamino traukiniui prožektorių, kurio veikimas buvo pagrįstas elektros lanku, paskui garvežį važiavo vagonas, prikrautas vien galvaninių elementų baterijų. Jų užtekdavo vienam reisui Peterburgas–Varšuva. Tik po to, kai Faradėjus atrado būdą, kaip mechaninę energiją paversti elektros energija, atsivėrė galimybė plačiai naudotis elektra.

Tarkime, kad į vienalytį magnetinį lauką, sudarytą tarp magneto polių N ir S, yra patalpintas rėmelis (226 pav.). Ant rėmelio ašies yra du vienas nuo kito izoliuoti žiedai, prie kurių prijungti jo galai, o prie žiedų prispaustos metalinės plokštelės, sujungtos su elektros lempute.



226 pav.

Sukant rėmelį pastoviu kampiniu greičiu $\omega$, magnetinis srautas, veriantis rėmelio plokštumą, nuolat kinta: kai rėmelio plokštuma statmena magnetinės indukcijos linijoms, einantis pro jį magnetinis srautas $\Phi$ esti didžiausias ir lygus $BS$ (čia $B$ – magnetinė indukcija, o $S$ – kontūro apribotas plotas). Kai rėmelių plokštumai išvesta normalė $\vec{n}$ sudaro su magnetinės indukcijos vektoriaus $\vec{B}$ kryptimi kampą $\varphi$, magnetinis srautas $\Phi = BS \cos \varphi$. Skaičiuojant laiką nuo to momento, kai plokščio kontūro normalės $\vec{n}$ kryptis sutampa su indukcijos vektoriaus $\vec{B}$ kryptimi, galime parašyti, kad pasisukimo kampas $\varphi = \omega t$; čia $\omega = \frac{2\pi}{T}$ yra besisukančio kontūro kampinis greitis, $t$ – sukimosi laikas ir $T$ – apsisukimo periodas. Tada $\Phi = BS \cos \omega t$. Pagal elektromagnetinės indukcijos dėsnį evj rėmeliuose yra lygi magnetinės indukcijos srauto kitimo greičiui (su minuso ženklu), t. y. magnetinės indukcijos srauto išvestinei laiko atžvilgiu:

$$\mathcal{E}_m = \Phi' = -BS(\cos \omega t)' = BS\omega \sin \omega t, \text{ arba } \mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega t; \qquad (240)$$

čia $\mathcal{E}_m = BS\omega$ – indukuotosios elektrovaros amplitudė. Tolygiai sukant rėmelį vienalyčiame magnetiniame lauke, indukuotoji elektrovara kinta pagal sinuso dėsnį. Kintamosios elektrovaros momentinė reikšmė $\mathcal{E}$ nėra pastovi.

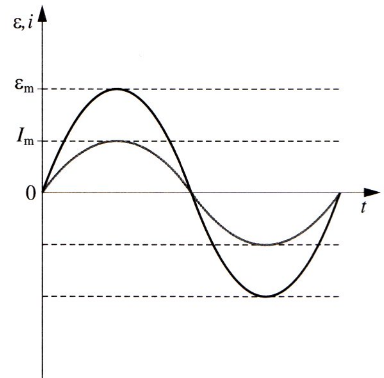
Jei grandinėje turime tik ominę varžą $R$, tai, padaliję abi 240 formulės puses iš $R$ ir pritaikę Omo dėsnį, gauname:

$$i = I_m \sin \omega t; \qquad (241)$$

čia $i$ – elektros srovės stiprio momentinė vertė, $I_m$ – elektros srovės amplitudinė vertė. Matome, kad ne tik evj, bet ir srovės stipris kinta pagal sinuso dėsnį ir jų fazės yra vienodos. Taigi nagrinėjamame rėmelyje evj ir srovės stipris periodiškai kinta tiek didumu, tiek ir kryptimi. Kad tolygiai besisukančiame rėmelyje indukuojama kintamoji elektros srovė, rodo užsidegusi lemputė. Jeigu 226 paveiksle lemputę pakeistume galvanometru, tai, rėmeliams apsisukus vieną kartą, galvanometro rodyklė atsilenktų į vieną ir į kitą pusę. Tai reiškia, kad rėmeliais (uždaru kontūru) tekanti srovė keičia ne tik didumą, bet ir kryptį. Vadinasi, rėmeliams padarius vieną apsisukimą, juose indukuotos elektros srovės kryptis pasikeičia du kartus.

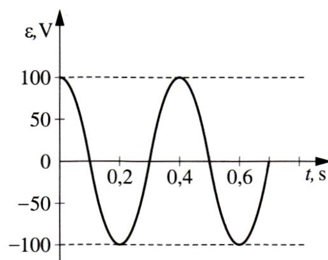
**Elektros srovė, kurios, laikui bėgant, keičiasi ne tik stipris, bet ir kryptis, vadinama *kintamája elèktros srovè*.**

Kintamoji evj ir kintamoji elektros srovė, esant kontūre tik ominei varžai $R$, grafiškai pavaizduotos 227 paveiksle. Tarp jų nėra jokio fazių skirtumo. Jei mūsų kontūras būtų sudarytas ne iš vienos vijos, o iš didelio vijų skaičiaus, tai, sukant jį tame pačiame vienalyčiame magnetiniame lauke, būtų gaunama atitinkamai didesnė kintamoji evj ir stipresnė elektros srovė. Tai ir yra paprasčiausias kintamosios srovės generatoriaus modelis.




227 pav.

## Klausimai ir užduotys




**1. Rėmelyje, kuris sukasi vienalyčiame magnetiniame lauke, indukuojama kintamoji evj, išreikšta sinuso dėsniu. Kaip ji pakis, jeigu rėmelio sukimosi dažnį padidinsime 2 kartus?**

**2. Iš parodyto grafiko nustatykite evj amplitudę ir dažnį. Parašykite evj kitimo lygtį.**

**3. Elektrovara kintamos srovės grandinėje išreiškiama formule $\mathcal{E} = 120 \sin 628\,t$. Apskaičiuokite jos kitimo periodą ir dažnį.**

# 97. Kintamosios elektros srovės stiprio ir įtampos efektinės vertės

Iš §96 gautų 240 ir 241 formulių apskaičiuojame tik momentines kintamosios evj ir elektros srovės stiprio reikšmes esant tam tikrai fazei. Praktikoje tenka apskaičiuoti kintamosios srovės galią ir per tam tikrą laiką atliktą darbą. Tuomet reikia žinoti tam tikras kintamosios srovės stiprio, evj arba įtampos vertes, vadinamas *efèktinėmis vertėmìs*. Esant grandinėje tik ominei varžai, efektinis kintamosios srovės stipris yra lygus tokios nuolatinės srovės stipriui, kuriam esant, per tą patį laiką išsiskiria toks pat šilumos kiekis, kaip ir tekant duotajai kintamajai srovei.

Efektinės kintamosios srovės ir nuolatinės srovės stiprių ekvivalentiškumui šiluminio veikimo atžvilgiu įrodyti pasinaudosime Džaulio ir Lenco dėsniu ($Q = UIt$ arba $Q = I^2Rt$). Imdami labai trumpą laiko tarpą, kintamosios srovės stiprį ir evj galime laikyti pastoviais. Tada per šį laiko tarpą $dt$ kintamosios srovės grandinėje išsiskyręs šilumos kiekis bus lygus: $dQ = i^2Rdt$. Į pastarąją formulę įrašę kintamosios srovės stiprio $i$ vertę iš (241) ir $\omega = \frac{2\pi}{T}$, gauname: $dQ = I_m^2 R \sin^2 \frac{2\pi}{T} dt$. Šį reiškinį suintegravę ribose nuo 0 iki $T$, nustatome kintamosios srovės grandinėje per periodą $T$ išsiskyrusios šilumos kiekį:

$$Q = I_m^2 R \frac{T}{2}; \tag{242}$$

čia $I_m$ – didžiausia kintamosios srovės stiprio vertė arba srovės amplitudė, $R$ – grandinės aktyvioji varža.

Jeigu nuolatinės ir kintamos srovės stipriai yra vienodo didumo, tai per laiką, lygų vienam periodui ($t = T$), laidininke išsiskiria toks pats šilumos kiekis $Q$, todėl pagal Džaulio ir Lenco dėsnį:

$$Q = I^2RT. \tag{243}$$

Sulyginę dešiniąsias 242 ir 243 lygybių puses ir matematiškai sutvarkę lygtį, gauname ryšį tarp kintamosios elektros srovės stiprio efektinės vertės ir jos amplitudės:

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \tag{244}$$

Kintamoji srovė gali tekėti tuo atveju, kai grandinėje indukuojama kintamoji evj arba įtampa. Jų efektinės vertės taip pat lygios evj arba įtampai tokios nuolatinės srovės, kuri savo šiluminiu veikimu gali pakeisti duotąją kintamąją srovę. Analogiškai 244 formulei gauname ryšį tarp elektrovaros arba įtampos efektinių verčių ($\mathcal{E}$, $U$) ir atitinkamų amplitudžių ($\mathcal{E}_{\mathrm{m}}$, $U_{\mathrm{m}}$):

$$\mathcal{E}_{\mathrm{ef}} = \frac{\mathcal{E}_{\mathrm{m}}}{\sqrt{2}} \text{ ir } U_{\mathrm{ef}} = \frac{U_{\mathrm{m}}}{\sqrt{2}}. \quad (245)$$

Kintamosios srovės stiprio ir įtampos efektines vertes parodo įjungti į grandinę prietaisai – ampermetras ir voltmetras, kuriuose pritaikytas šiluminis srovės veikimas.

### Klausimai ir užduotys

**1. Elektros srovės stipris kinta pagal dėsnį $I$ = 8,5 sin(314$t$ + 0,651). Apskaičiuokite jo efektinę vertę, pradinę fazę ir dažnį. Koks yra elektros srovės stipris momentais $t_1$ = 0,08 s ir $t_2$ = 0,042 s?**

**2. Pramoninio dažnio kintamosios srovės tinklo efektinė įtampa 220 V. Parašykite įtampos momentinės vertės kitimo lygtį ir nubraižykite jos grafiką.**

**3. Rėmelis iš 60 vijų yra vienalyčiame 0,025 T indukcijos magnetiniame lauke ir tolygiai sukasi apie statmeną jėgų linijoms nejudančią ašį, atlikdamas po 360 apsisukimų per minutę. Rėmelio kraštinės, lygiagrečios sukimosi ašiai, yra 96 cm ilgio, o atstumas nuo sukimosi ašies 20 cm. Apskaičiuokite rėmelyje indukuojamos evj efektinę vertę.**

**4. Ritė su feromagnetine šerdimi paeiliui įjungiama į nuolatinės ir kintamosios srovės grandines, kuriose ją veikia vienoda įtampa. Ar ja teka vienodo stiprio elektros srovė? Jeigu ne, tai kuriuo atveju stipresnė? Atsakymą pagrįskite.**

## 98. Aktyvioji ir reaktyvioji varža kintamosios srovės grandinėje. Elektrinės grandinės rezonansas

Visos varžos kintamosios srovės grandinėje skirstomos į dvi rūšis:

1) **aktyvióji varžà – tai tokia varža, kuria tekant kintamajai elektros srovei išsiskiria šiluma ir dėl to susidaro energijos nuostoliai** (tai įvairios kaitinimo spiralės, kaitinimo lempos, reostatai, jungiamieji laidai ir t. t.);

2) **reaktyvióji varžà – tai tokia varža, kuria tekant kintamajai elektros srovei energija neišsiskiria, o tiktai vienos rūšies energija virsta kitos rūšies energija** (pvz., elektrinė lauko energija virsta magnetinio lauko energija ir atvirkščiai).

Reaktyviosios varžos gali būti dviejų rūšių: a) induktyvioji varža – kai grandinėje įjungta ritė; b) talpuminė varža – kai grandinėje įjungtas kondensatorius.

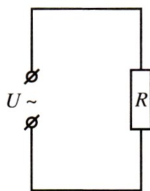
Kintamosios srovės grandinėje įtampa ir srovės stipris kinta harmoningai pagal sinuso arba kosinuso dėsnį, tačiau tarp $I$ ir $U$ gali atsirasti fazių skirtumas, o tai reiškia, kad srovės stipris ir įtampa nevienodu laiko momentu pasiekia maksimalias

ir minimalias vertes $U = U_m \cos \omega t$ ir $I = I_m \cos(\omega t + \varphi)$. Bendru atveju fazių skirtumas $\varphi$ gali kisti ribose $\left(+\frac{\pi}{2}; -\frac{\pi}{2}\right)$ priklausomai nuo to, kiek aktyviųjų ir reaktyviųjų varžų įjungta į kintamosios srovės grandinę.

Išnagrinėkime atskirus tokių kintamosios elektros srovės grandinių atvejus.

1. Grandinėje įjungta aktyvioji varža $R$ (228 pav.).

Įtampa ir srovė kinta pagal tą patį dėsnį. Vadinasi, fazių skirtumas tarp srovės ir įtampos lygus 0, todėl šių dydžių lygtis galime užrašyti taip:



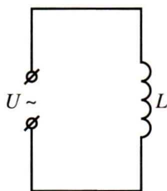
228 pav.

$$U = U_m \cos \omega t \quad \text{ir} \quad I = \frac{U}{R} = \frac{U_m \cos \omega t}{R} \quad \text{arba} \quad I = I_m \cos \omega t.$$

2. Grandinėje įjungta ritė, kurios induktyvumas $L$. Ja tekančios elektros srovės stiprį ir indukuotą evj galime užrašyti tokiomis formulėmis:

$I = I_m \cos \omega t,$

$\mathcal{E} = -LI' = -L(I_m \cos \omega t)' = LI_m \omega \sin \omega t.$



229 pav.

Iš matematikos kurso žinome, kad $\sin\alpha = -\cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right)$, tada

$\mathcal{E} = -LI_m \omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$

Įtampos kitimo ritėje dėsnis užrašomas taip: $U = -\mathcal{E}$. Iš jo išplaukia, kad $U = -\mathcal{E} = -LI_m \omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$, o $I = I_m \cos \omega t$. Iš pastarųjų lygčių matome, kad elektros srovė įtampos atžvilgiu atsilieka faze $\frac{\pi}{2}$. Vadinasi, ritė priešinasi bet kokiems srovės modulio ir krypties pasikeitimams ir, grandinei suteikus įtampą, dar turi praeiti tam tikras laiko tarpas (lygus $\frac{1}{4}$ periodo), kol srovė ritėje pasieks maksimalią vertę. Kuo ritės induktyvumas didesnis, tuo daugiau reikia laiko elektros srovei pasiekti maksimalią vertę. Iš lygties $U = -LI_m \omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ matyti, kad induktyvioji varža

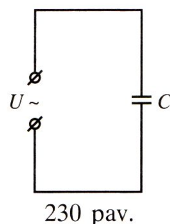
$$x_L = \omega L, \quad \text{arba} \quad x_L = 2\pi f L, \qquad (246)$$

nes $\omega = 2\pi f$.

Nuolatinės srovės grandinėje ritė induktyviosios varžos neturi ($f \to 0$, tai ir $x_L \to 0$). Ritės inertiškumas paaiškinamas taip: **kuo didesnis kintamosios elektros srovės dažnis, tuo jai sunkiau pakeisti didumą ir kryptį.**

3. Grandinėje įjungtas kondensatorius, kurio talpa $C$ (230 pav.). Grandine tekanti elektros srovė pakrauna kondensatorių, ir įtampa tarp jo plokštelių pasidaro lygi $U = U_m \cos \omega t$.

Pasinaudodami jau turimomis žiniomis, randame srovės kitimo dėsnį: $q = CU = CU_m \cos \omega t$. Kadangi elektros srovės stipris yra krūvio išvestinė, tai $I = q' = (CU_m \cos \omega t)' = -CU_m\omega \sin \omega t$ arba $I = CU_m\omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$.



230 pav.

Palyginę šią lygtį su įtampos lygtimi $U = U_m \cos \omega t$, matome, kad kintamoji elektros srovė pralenkia įtampą kondensatoriuje faze $\frac{\pi}{2}$. Tai paaiškinama tuo, kad, kintamajai elektros srovei pradėjus tekėti grandine, kurioje yra kondensatorius, praeis tam tikras laiko tarpas (lygus $\frac{1}{4}$ periodo), kol kondensatorius pilnai pasikraus ir krūvis bei įtampa pasieks maksimalias vertes.

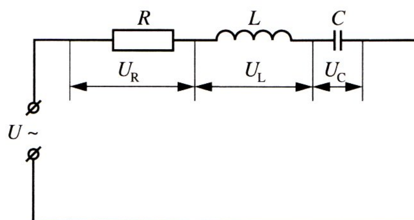
Iš formulės $I = CU_m\omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ išplaukia, kad talpinė varža

$$x_C = \frac{1}{\omega C}, \text{ arba } x_C = \frac{1}{2\pi f C}, \tag{247}$$

nes $\omega = 2\pi f$.

Nuolatinės srovės kondensatorius visai nepraleidžia. Kadangi jos dažnis $\nu \to 0$, tai kondensatoriaus talpinė varža be galo padidėja ($x_C \to \infty$). Kintamosios srovės tekėjimą kondensatoriumi suprantame kaip periodinį kondensatoriaus plokštelių persielektrinimą.

Jeigu prie elektros grandinės, sudarytos iš nuosekliai sujungtų aktyviosios varžos, kondensatoriaus ir ritės (231 pav.), prijungtume kintamąją įtampą, tai grandinėje atsirastų priverstiniai srovės stiprio ir įtampos elektriniai virpesiai.



231 pav.

Kondensatoriaus talpinė varža $x_C$ ir ritės induktyvioji varža $x_L$ priklauso nuo prijungtos įtampos dažnio $\omega$. Kai įtampos virpesių amplitudė $U_m$ pastovi, srovės stiprio amplitudė $I_m$ grandinėje priklauso nuo kintamosios įtampos dažnio $\omega$.

Prijungtos įtampos dažniui didėjant (nuo nulio), kondensatoriaus talpinė varža $x_C$ mažėja. Dėl to didėja srovės stiprio virpesių amplitudė. Kitaip negu talpinė varža, induktyvioji ritės varža, didėjant dažniui, didėja. Didėjant prijungtos įtampos dažniui, srovės stiprio virpesių amplitudė grandinėje didėja tol, kol ritės induktyvioji varža pasidaro lygi kondensatoriaus talpinei varžai:

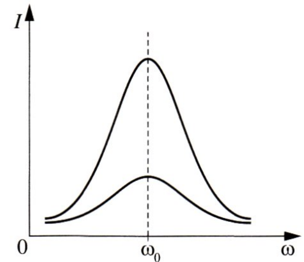
$$\omega L = \frac{1}{\omega_0 C}. \tag{248}$$

Kai tenkinama 248 sąlyga (t. y. kai ritės induktyvioji varža lygi kondensatoriaus talpinei varžai), elektros srovės stipris vienodas, o kondensatoriaus ir ritės įtampos virpesių amplitudės yra lygios. Kadangi ritės ir kondensatoriaus įtampos virpesių fazės priešingos, tai tų įtampų suma, kai tenkinama 248 sąlyga, kiekvienu laiko momentu lygi nuliui. Vadinasi, įtampa aktyviojoje varžoje lygi pilnutinei grandinės

įtampai: $U = U_R$, o srovės stipris grandinėje pasiekia didžiausią vertę, t. y. įvyksta rezonansas.

Toliau didėjant dažniui, ritės induktyvioji varža pradeda viršyti kondensatoriaus talpinę varžą. Dėl to mažėja srovės stiprio virpesių amplitudė (232 pav.).

Iš 248 lygties išplaukia, kad elektrinis rezonansas nuoseklaus jungimo grandinėje, sudarytoje iš kondensatoriaus ir ritės, prasideda tada, kai dažniai $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ ir $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ yra lygūs. Vadinasi, elektros grandinės rezonanso dažnis $\omega_0$ sutampa su jos savųjų elektrinių virpesių dažniu.



232 pav.

## Klausimai ir užduotys

**1. 250 μF talpos kondensatorius įjungiamas į kintamosios srovės grandinę. Apskaičiuokite jo varžą, kai elektros srovės dažnis lygus 50, 200 ir 400 Hz.**

**2. 35 μH induktyvumo ritė įjungta į kintamosios srovės grandinę. Kokia yra jos induktyvioji varža, kai srovės dažnis lygus 60, 240 ir 480 Hz?**

**3. Ritė, kurios aktyvioji varža 2 Ω ir induktyvumas 75 mH, prijungta nuosekliai su kondensatoriumi prie 50 Hz dažnio ir 50 V įtampos kintamosios srovės tinklo. Kokia turi būti kondensatoriaus talpa, kad toje grandinėje įvyktų įtampų rezonansas? Kokia įtampa veikia ritę ir kokia – kondensatorių?**

**4. Į 400 Hz dažnio kintamosios srovės tinklą įjungta 0,1 H induktyvumo ritė. Kokios talpos kondensatorių reikia įjungti į šią grandinę, kad susidarytų rezonansas?**

**5. Kondensatorius įjungtas į 220 V įtampos standartinio dažnio kintamosios srovės tinklą. Srovės stipris šio kondensatoriaus grandinėje 2,5 A. Kokia yra kondensatoriaus talpa?**

**6. Nykstamai mažos aktyviosios varžos indukcinė ritė įjungta į 50 Hz dažnio kintamosios srovės grandinę. Kai įtampa lygi 125 V, elektros srovės stipris lygus 2,5 A. Apskaičiuokite ritės induktyvumą.**

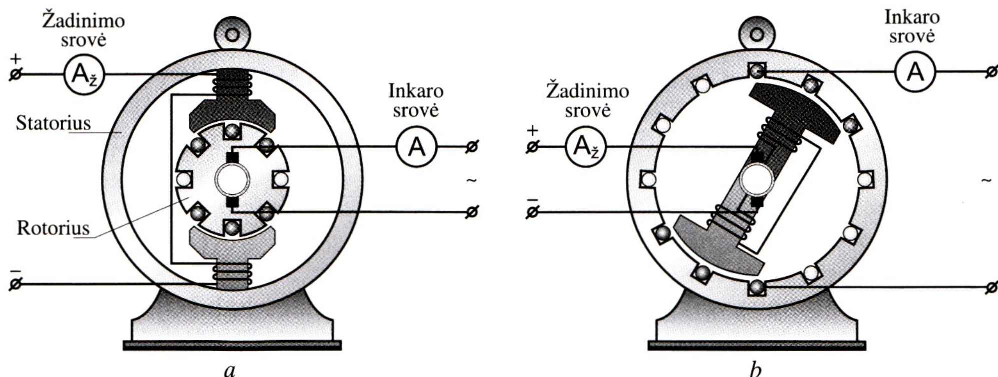
## 99. Kintamosios srovės generatorius

Sukant rėmelį magnetiniame lauke (§96; 226 pav.), mechaninė energija virsta elektros energija. **Elektros mašina, mechaninę energiją paverčianti elektros energija, vadinama elèktros enèrgijos generãtoriumi.** Vadinasi, minėtas rėmelis yra paprasčiausias kintamosios srovės generatoriaus modelis. Jeigu jį sudaro ne viena, o daugiau vijų, tai gaunama atitinkamai didesnė kintamoji evj ir stipresnė srovė.

Šiuolaikiniai pramoniniai generatoriai yra sudėtingos mašinos su automatinėmis kontrolės, reguliavimo ir apsaugos sistemomis, tačiau visose jose yra trys pagrindinės dalys:

1) mašinos dalis, kuri sukuria magnetinį lauką, – vadinamoji **žadinimo sistemà**,
2) mašinos dalis, kurioje indukuojasi evj, – vadinamasis **iñkaras**,
3) **slankíeji kontãktai** srovei perduoti.

Žadinimo sistema – tai elektromagnetas, kurio apvija teka vadinamoji žadinimo srovė (233 pav.). Jos kuriamas magnetinis srautas sklinda beveik uždara magnetine sistema, kurią sudaro dvi šerdys. Mašinos korpusas ir nejudanti šerdis su žadinimo apvija – tai nejudanti mašinos dalis, vadinama *stãtoriumi*. Jos viduje sukasi antroji šerdis, kurios grioveliuose suklota inkaro apvija. Ši besisukanti mašinos dalis vadinama *ròtoriumi*. Iš besisukančio rotoriaus srovė perduodama į elektros tinklą slankiaisiais kontaktais: prie rotoriaus apvijos galų pritvirtinami kontaktiniai žiedai, o prie jų prispaudžiamos grafinės trinkelės – šepečiai, sujungti su išorine grandine (233 pav., *a*, ir 226 pav.).




233 pav.

Veikiant galingam generatoriui, slankiaisiais kontaktais teka stipri elektros srovė. Dėl to šepečiai kibirkščiuoja, kaista, greitai apdega kontaktiniai žiedai. Norint to išvengti, galinguose generatoriuose induktorius ir inkaras sukeičiami vietomis: inkaro apvija, kurioje indukuojasi didelė srovė, nejudamai įtvirtinama statoriaus šerdies grioveliuose, o rotoriumi tampa besisukantis elektromagnetas; jis vadinamas induktoriumi (233 pav., *b*). Induktoriui maitinti reikalinga žadinimo srovė daug kartų silpnesnė už generuojamąją srovę. Ją tiekia specialus to paties veleno sukamas nuolatinės srovės generatorius – žadinimo generatorius.

## Klausimai ir užduotys

**1. Kintamosios srovės generatoriuose įtampa paprastai susidaro nejudančioje apvijoje, kai magnetinis laukas sukasi. Kodėl nejudančioje apvijoje atsiranda elektros srovė? Kodėl apvija dedama ant šerdies, pagamintos iš minkštojo plieno?**

**2. Kintamosios srovės generatoriuje magnetinį lauką sukuria ne viena, o kelios polių poros. Ar indukuotosios srovės dažnis priklauso nuo polių porų skaičiaus? Polių sukimosi greitis pastovus.**

**3. HE generatorius turi 24 polių poras ir gamina standartinio dažnio elektros srovę. Koks yra tokio generatoriaus rotoriaus sukimosi dažnis?**

**4. HE generatoriaus, gaminančio standartinio dažnio srovę, sukimosi dažnis – 62,5 aps/min. Kiek porų polių turi generatorius?**

## 100. Kintamosios srovės transformatorius

Energijos vartotojų yra daug ir įvairių. Apie 70% jos suvartoja pramonės įmonės. Daug energijos reikia transportui, buičiai. Pagrindinis vaidmuo tenka elektros energijai. Ji gaminama hidroelektrinėse, šiluminėse ir atominėse elektrinėse.

Hidroelektrinėse krintantis nuo užtvankos vanduo verčia suktis hidraulinę turbiną, o ši – elektros srovės generatoriaus rotorių.

Branduolinių reaktorių išskirta šiluma vartojama juos vėsinančiam vandeniui ar kitiems skysčiams kaitinti bei išgarinti. Susidarę aukšto slėgio garai suka turbiną, o ši – elektros srovės generatoriaus rotorių.

Vartojant elektros energiją, reikalinga labai įvairi įtampa – nuo keleto voltų žaisliniams traukinėliams iki tūkstančių ir šimtų tūkstančių voltų tolimojo elektros perdavimo linijose.

Kintamosios srovės įtampą nesudėtinga keisti beveik neprarandant energijos. Ši jos ypatybė nulėmė tai, kad technikoje daugiausia naudojama kintamoji, o ne nuolatinė elektros srovė.

*Kintamosios įtampos ir srovės stiprio kitimas nekeičiant dažnio vadinamas transformãvimu, o elektromagnetinis prietaisas, skirtas kintamajai srovei transformuoti, vadinamas transformãtoriumi.*

Transformatoriaus veikimas pagrįstas elektromagnetinės indukcijos reiškiniu.

Transformatorių sudaro dvi izoliuotos vielos ritės, turinčios bendrą plieninę šerdį (234 pav.). Techninių transformatorių šerdys būna įvairios formos. Šerdis gaminama iš atskirų plieninių plokščių, izoliuotų viena nuo kitos. Ant jos užmaunamos dvi apvijos $S_1$ ir $S_2$, kuriose vijų skaičius atitinkamai lygus $N_1$ ir $N_2$.

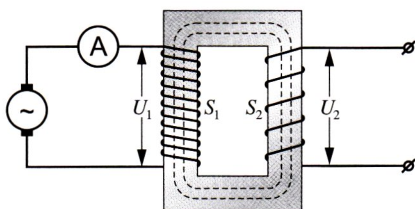
Prie apvijos $S_1$, kurią vadinsime pirmine, galų prijungus kintamąją įtampą $U_1$ (iš tinklo arba iš generatoriaus), apvija ims tekėti kintamoji elektros srovė $I$, kuri įmagnetins šerdies plieną ir sukurs jame kintamą magnetinį srautą.

Šis srautas kirs antrinės transformatoriaus apvijos $S_2$ vijas ir kiekvienoje šios apvijos vijoje sukels evj. Indukuotoji evj tarp apvijos galų sudarys įtampą $U_2$.

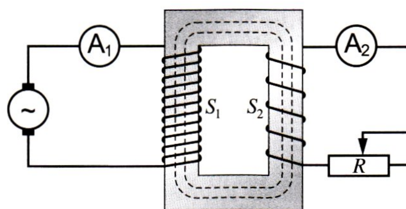
Matuodami neapkrauto transformatoriaus pirminės ir antrinės apvijos įtampą, įsitikinsime, kad **transformatoriaus apvijų įtampų santykis yra lygus tų apvijų vijų skaičių santykiui**:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k. \qquad (249)$$

Pastovus dydis $k$ vadinamas transformatoriaus *transformãcijos koeficientù.*



234 pav.



235 pav.

*Įtampos aukštinimo transformatoriaus antrinėje apvijoje yra daugiau vijų negu pirminėje, o įtampos žeminimo transformatoriaus – atvirkščiai, antrinėje apvijoje – mažiau vijų negu pirminėje.* Todėl aukštinančiojo transformatoriaus transformacijos koeficientas yra mažesnis už 1 ($k < 1$), o žeminančiojo transformatoriaus – didesnis už vienetą ($k > 1$).

Kol antrinė apvija atvira (srovės joje nėra), transformatorius dirba tuščiąja eiga. Jis sunaudoja nedaug šaltinio energijos.

Apkraukime transformatorių, sujungę jo antrinės apvijos grandinę reostatu $R$ (235 pav.). Antrine grandine pradės tekėti indukcinė srovė $I_2$. Tada pirminėje grandinėje srovė padidės ir bus lygi $I_1$.

Kadangi transformatoriaus naudingumo koeficientas yra artimas vienetui, tai, nepaisydami nuostolių transformatoriuje ir taikydami energijos tvermės dėsnį, galime parašyti: $I_1U_1t = I_2U_2t$ arba $I_1U_1 = I_2U_2$. Iš čia matome, kad elektros srovės galia pirminėje transformatoriaus grandinėje yra lygi galiai antrinėje transformatoriaus grandinėje.

Iš pastarosios lygybės gauname, kad

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} \quad \text{arba} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}. \qquad (250)$$

**Srovės, tekančios pirmine ir antrine apkrauto transformatoriaus grandinėmis, atvirkščiai proporcingos tų apvijų vijų skaičiui.**

Transformatorius yra vienas tobuliausių prietaisų energijai keisti. Šių dienų galingų transformatorių naudingumo koeficientas siekia 94–98%.

Įtampos transformavimo idėja pirmą kartą kilo rusų mokslininkui P. Jabločkovui, kuris praktiškai panaudojo įtampos transformatorių savo „žvakėms“ maitinti.

Toliau plėtodamas šią idėją, Maskvos universiteto asistentas Ivanas Usaginas 1882 m. pagamino transformatorių, kurio pagrindines dalis turi ir šių dienų transformatoriai.

## Klausimai ir užduotys

**1. Transformatorius, dirbdamas tuščiąja eiga, ima iš tinklo mažai energijos. Kam ji eikvojama?**

**2. Kodėl transformatorių naudingumo koeficientas yra daug didesnis už elektros variklių naudingumo koeficientą?**

**3. Kai prie transformatoriaus pirminės apvijos prijungiama 220 V įtampa, antrinėje apvijoje tuščiosios eigos atveju susidaro 130 V įtampa. Pirminėje apvijoje yra 400 vijų. Kiek vijų yra antrinėje apvijoje, jeigu sklaidos srautas sudaro 3,8%?**

**4. Transformatoriaus apvijos padarytos iš įvairaus storio laidų. Kurioje apvijoje yra daugiau vijų?**

**5. Transformatoriaus pirminėje apvijoje yra 840 vijų. Jis pakelia įtampą nuo 220 V iki 660 V. Koks transformacijos koeficientas? Kiek vijų yra antrinėje apvijoje? Kurios apvijos laidų skerspjūvis yra didesnis?**

**6. Žeminimo transformatorius, kurio transformacijos koeficientas yra 10, įjungtas į 220 V įtampos tinklą. Antrinės apvijos varža 0,2 Ω, o naudingosios apkrovos varža 2 Ω. Kokia įtampa yra transformatoriaus išvaduose?**

**7. Transformatoriaus antrinę apviją, turinčią 100 vijų, kerta magnetinis srautas, kurio kitimo pagal laiką dėsnis yra $\Phi = 0{,}01\cos 311t$. Parašykite formulę, išreiškiančią antrinės apvijos evj priklausomybę nuo laiko, ir raskite evj efektinę vertę.**

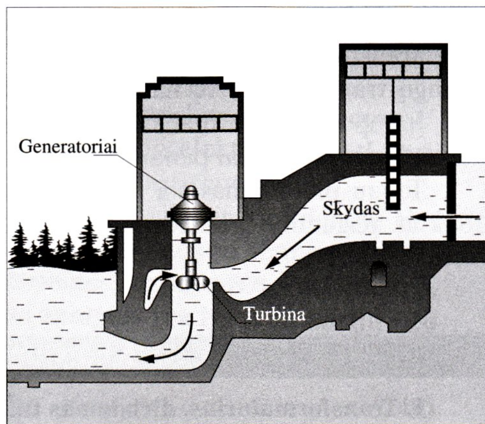
## 101. Elektros energijos gamyba ir perdavimas. Energetinės sistemos

Elektros energija gaminama elektrinėse. *Pagal vartojamos energijos rūšį elektrinės skirstomos į šilumines elektrines (ŠE), hidroelektrines (HE), atomines elektrines (AE), saulės, vėjo ir kitokias.*

Šiluminėse elektrinėse pirminis energijos šaltinis yra kuras – nafta, akmens anglys, skalūnai, mazutas, dujos. ŠE ekonominiai rodikliai labai pagerėja, jeigu, aušinant agregatus, įšilusio vandens energija panaudojama pastatams centralizuotai apšildyti. Tai – termofikacinės elektrinės.

Hidroelektrinėse (236 pav.) vandens srauto energija verčiama elektros energija.

Pastaraisiais dešimtmečiais visame pasaulyje vis daugiau elektros energijos pagaminama atominėse elektrinėse. Atominis kuras labai brangus: perdirbus 1 t urano rūdos, gaunama tik 5 g urano, tinkamo atominiam kurui. Tačiau iš tų 5 g urano atominiame reaktoriuje pagaminama 112 000 kWh elektros energijos – tiek pat, kiek sudeginus 15 t akmens anglių šiluminėje elektrinėje.




236 pav.

Plėtojant elektros energetiką, iškyla daug gamtosaugos problemų, pavyzdžiui, kaip mažinti šiluminių elektrinių išmetamų į aplinką kenksmingų degimo produktų kiekį, kaip užtikrinti atominių elektrinių saugumą ir kt.

Ekonomiškai tikslinga statyti elektrines ten, kur yra dideli pigaus kuro ištekliai, ir gabenti ne kurą, o elektros energiją.

Lietuvos elektrifikacijos pagrindas yra įvežtinis kuras (mazutas, akmens anglys, dujos, atominis kuras). Vietiniai energijos ištekliai – hidroenergija ir durpės – turi tik antraeilę reikšmę.

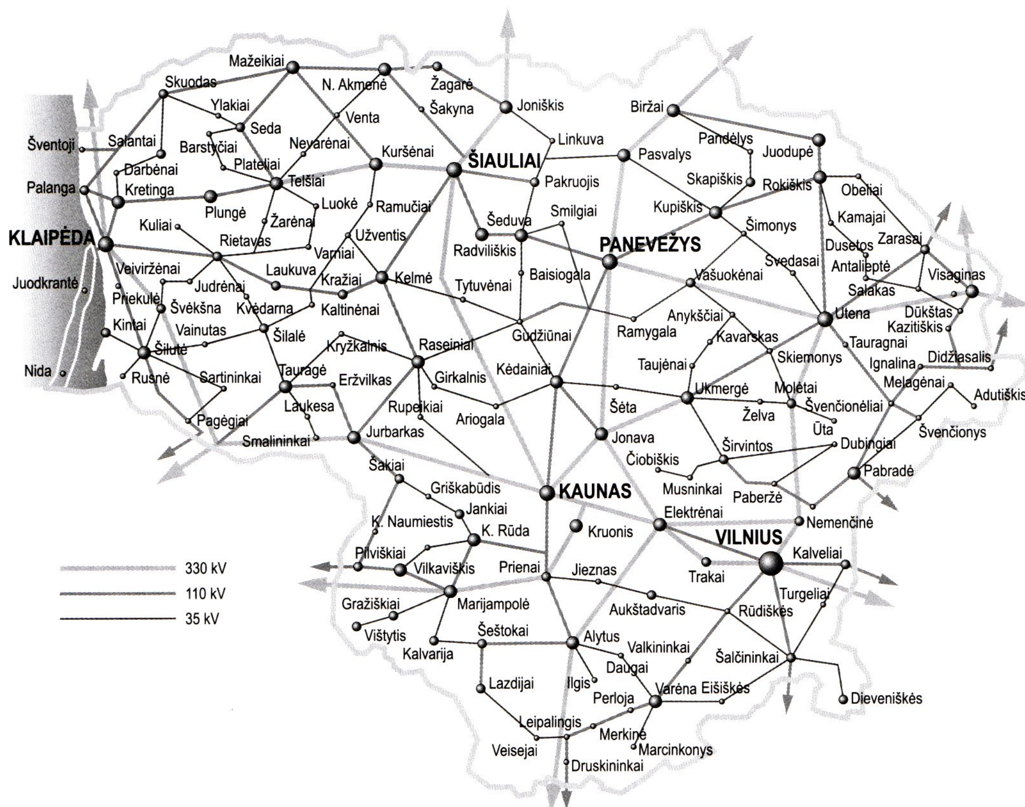
Didžiausios galios elektrinės yra: Ignalinos atominė – 2300 MW, Elektrėnų valstybinė rajoninė šiluminė – 1800 MW, Kaišiadorių hidroakumuliacinė – 400 MW, Vilniaus termofikacinė – 360 MW, Mažeikių termofikacinė – 250 MW, Kauno termofikacinė – 212 MW, Kauno hidroelektrinė – 100 MW. Ypač daug stambių didelės galios elektrinių veikia Rusijoje: Sajanų Šušensko HE prie Jenisiejaus – 6400 MW,

didžiausia pasaulyje; Krasnojarsko HE prie Jenisiejaus – 6000 MW; Bratsko HE prie Angaros – 5000 MW ir kt.

Lietuvoje yra per 120 000 km elektros tiekimo linijų. Jomis būtų galima tris kartus apjuosti Žemės rutulį. Perduodant elektros energiją, nuostoliai elektros tinkluose sudaro 11%–12%, taigi mūsų respublikoje kasmet prarandama per 2 mlrd. kWh elektros energijos! Tai dukart daugiau, negu jos buvo pagaminta Lietuvoje 1960 m.

Siekiant sumažinti perduodamos elektros energijos nuostolius, reikia perdavimo linijose kiek įmanoma mažinti srovės stiprį. Kadangi linijos laiduose išsiskiriantis šilumos kiekis pagal Džaulio dėsnį yra tiesiog proporcingas srovės stiprio kvadratui ($Q = I^2Rt$), sumažinus srovės stiprį, pavyzdžiui, 10 kartų, energijos nuostoliai sumažėtų 100 kartų. Tačiau mažinti srovės stiprį ir nekeisti galios galima tik proporcingai padidinant įtampą. Tai atlieka aukštinimo transformatoriai. Kuo ilgesnė perdavimo linija, tuo aukštesnė įtampa joje vartojama. Šiuo metu veikia 35 kV, 110 kV, 330 kV, 500 kV, 750 kV ir 1150 kV aukštos įtampos linijos.

Įtampa elektros energijai perduoti keliama keliomis pakopomis, o energijos vartojimo vietoje įtampa vėl keliomis pakopomis žeminama. Lietuvos elektros perdavimo linijų tinklas ir svarbiausios elektrinės parodytos 237 paveiksle.




237 pav.

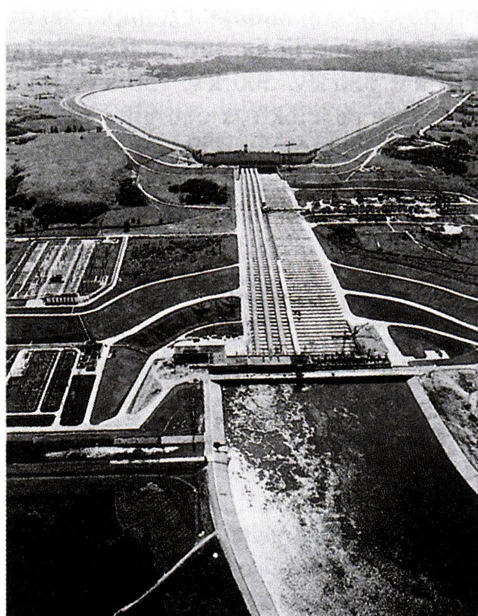
Elektrinės, elektros tinklai ir vartotojai tam tikroje teritorijoje jungiami į *energètines sistemàs*. Energetinėje sistemoje galima ekonomiškiau paskirstyti elektrinių apkrovas, sumažinti energijos savikainą, nenutrūkstamai tiekti energiją išėjus iš rikiuotės kuriam nors objektui.

Gretimų rajonų energetinės sistemos jungiamos į jungtines energetines sistemas, o pastarosios – į vieningąją energetinę sistemą. Ši sistema sujungta su kitų šalių energetinėmis sistemomis.

Lietuvos energetinė sistema įeina į Baltijos šalių jungtinę energetinę sistemą, apimančią Baltijos respublikas. Sistemos dispečerinis centras yra Rygoje.

Elektros energija vartojama labai netolygiai. Daugiausia jos suvartojama vakare. Vien tik įjungus vienu metu visus Lietuvos televizorius, papildomai reikia 0,2 mln. KW galios. Tai – dviejų Kauno hidroelektrinių pajėgumas! Mažiausiai energijos vartojama naktį (nuo 1 h iki 6 h). Tuo metu tenka pristabdyti elektrines, atjungti generatorius, o tai labai neekonomiška.

Didelėse energetinėse sistemose elektros energijos vartojimui išlyginti statomos hidroakumuliacinės elektrinės (HAE). Hidroakumuliacinė elektrinė kitų elektrinių elektros energijos perteklių verčia vandens potencine energija – kelia vandenį į viršutinį rezervuarą. O vandens potencinė energija, kai reikia, vėl verčiama elektros energija, nes HAE agregatai gali dirbti ir kaip vandens siurbliai, ir kaip hidrogeneratoriai. Kaišiadorių HAE (238 pav.) vieno agregato galia 200 MW. Apatinis jos baseinas yra Kauno marios, o viršutinis įrengtas 110 m aukštyje. Vanduo kyla į viršutinį baseiną ir teka atgal į marias 8 m skersmens vamzdžiais.



238 pav.

# 15 SKYRIUS. ELEKTROMAGNETINIAI VIRPESIAI IR BANGOS

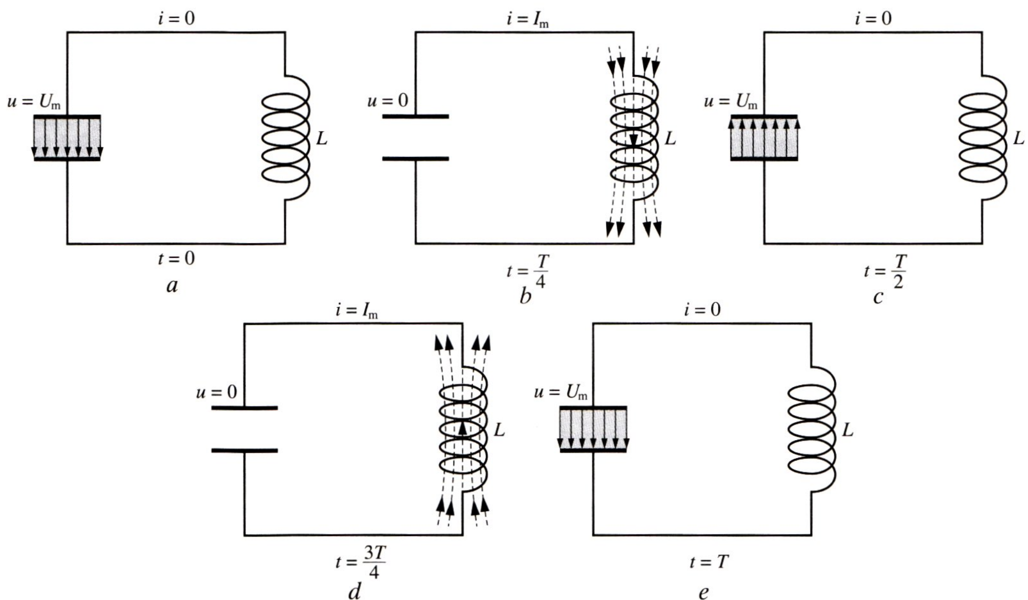
## 102. Virpesių kontūras. Elektrinių virpesių periodas

**Aukšto dažnio kintamoji srovė vadinama elektrìniais virpesiaĩs, kurie sukuriami virpesių kontūru.**

Virpesių kontūrą sudaro kondensatorius, kurio talpa $C$, ir ritė, kurios induktyvumas $L$. Kad tokioje elektrinėje sistemoje atsirastų elektriniai virpesiai, pirmiausiai reikia įkrauti kondensatorių (239 pav., *a*) iki tam tikros įtampos $U_m$.

Kondensatoriui įsikrovus, srovė kontūre neteka ($I = 0$). Visa iš šaltinio gautoji energija yra sukaupta elektriniame lauke, kuris susikuria tarp kondensatoriaus plokštelių: $W_e = \frac{1}{2} C U_m^2$.

Atjungus šaltinį, kondensatorius pradeda išsikrauti per ritę ir kontūru teka stiprėjanti elektros srovė, kuri dėl saviindukcijos pasiekia didžiausią reikšmę ($I = I_m$) laiko momentu $t = \frac{T}{4}$. Kondensatoriui baigiant išsikrauti, įtampa tarp kondensatoriaus plokštelių $U$ tampa lygi nuliui (239 pav., *b*). Buvusio tarp kondensatoriaus plokštelių elektrinio lauko energija virsta rite tekančios elektros srovės magnetinio lauko energija $W_m = \frac{1}{2} L I_m^2$. Po to elektros srovė pradeda silpnėti, bet




239 pav.

dėl saviindukcijos pasidaro lygi nuliui tik laiko momentu $t = \frac{T}{4}$. Vadinasi, ji vėl įkrauna kondensatorių (bet jau priešingų ženklų krūviais). Jo įtampa didžiausią reikšmę pasiekia tik tada, kai rite nustoja tekėti elektros srovė. Ritės magnetinio lauko energija virsta elektrinio lauko tarp kondensatoriaus plokštelių energija (239 pav., *c*). Toliau elektros krūviai, sukaupti ant kondensatoriaus plokštelių, stengiasi neutralizuotis, todėl ima tekėti priešingos krypties srovė, kuri didžiausią reikšmę pasiekia, kai kondensatorius baigia išsikrauti, t. y. momentu $t = \frac{3T}{4}$. Elektrinio lauko energija virsta srovės magnetinio lauko energija (239 pav., *d*). Pagaliau, elektros srovei silpnėjant, ritės magnetinio lauko energija vėl pavirsta elektrinio lauko tarp kondensatoriaus plokštelių energija (kai $t = T$).

Toliau visas aprašytas procesas kartojasi iš naujo.

Jei šie virpesiai neslopinami, kontūro energija visą laiką išlieka pastovi. Ji lygi kondensatoriaus elektrinio lauko ir ritės magnetinio lauko energijų sumai:

$$W = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2}. \qquad (251)$$

**Kontūre sukurti virpesiai yra elektrinio ir magnetinio laukų energijų periodinis kitimas.**

Realus virpesių kontūras visuomet turi (kad ir nedidelę) ominę varžą, todėl dalis elektros energijos virsta šilumine energija ir virpesiai kontūre gęsta.

Kiekvienam virpesių kontūrui būdingas savasis elektrinių virpesių dažnis, randamas pagal formulę

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \qquad (252)$$

Elektromagnetiniai virpesiai apibūdinami tais pačiais fizikiniais dydžiais kaip ir kintamoji elektros srovė, t. y. virpesių periodu $T$ ir dažniu $f$.

**Laikas, per kurį įvyksta vienas elektros srovės stiprio svyravimas (elektromagnetinis virpesys)** (239 pav., *b*, *c*, *d*, *e*), **vadinamas virpesių̃ periodù**. Periodas matuojamas sekundėmis: $[T]$ = s.

Virpesių skaičius per vieną sekundę vadinamas *dažniù f*. Dažnis matuojamas *hèrcais* (Hz): $[f] = 1/\text{s} = \text{s}^{-1}$ = Hz. Radiotechnikoje tenka susidurti su labai dideliais virpesių dažniais, kurie matuojami kilohercais ir megahercais: 1 kHz = $10^3$ Hz; 1 MHz = $10^6$ Hz.

Iš periodo ir dažnio apibrėžimų išplaukia, kad šiuos fizikinius dydžius sieja atvirkštinė priklausomybė: $f = \frac{1}{T}$.

Kai virpesių kontūro aktyvioji varža labai maža ($R \to 0$), laidininkai nekaista ir visa kondensatoriuje sukaupta elektrinio lauko energija virsta magnetinio lauko energija: $W_e = W_m$. Šią lygybę galima perrašyti taip: $\frac{LI^2}{2} = \frac{CU^2}{2}$, arba $LI^2 = CU^2$. Į pastarąją formulę įrašykime elektros srovės išraišką iš Omo dėsnio grandinės daliai, kurioje yra induktyvumas $L$: $I = \frac{U}{x_L} = \frac{U}{2\pi f L} = \frac{U}{\frac{2\pi L}{T}}$. Taigi $L\left(\frac{UT}{2\pi L}\right)^2 = CU^2$.

Pakėlę kvadratu ir suprastinę, gauname: $C = \frac{T^2}{4\pi^2 L}$. Iš šios lygybės išreikškime kontūro virpesių periodą:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \qquad (253)$$

Virpesių kontūro periodo formulę 1853 m. pirmasis nustatė anglų fizikas Viljamas Tomsonas (*Thomson*; 1824–1907), todėl ji ir pavadinta Tomsono formule. Tai – viena svarbiausių radiotechnikos formulių.

## Klausimai ir užduotys

**1. Kaip pasikeis laisvųjų virpesių periodas ir dažnis kontūre, kurio $R = 0$, jeigu induktyvumas du kartus padidės, o talpa keturis kartus sumažės?**

**2. Kokį vaidmenį virpesių kontūre atlieka induktyvumas ir talpa?**

**3. Kokią reikšmę virpesių kontūre turi ritės aktyvioji varža?**

**4. Kokiam tikslui į virpesių kontūrą kartais įjungiamas kintamosios talpos kondensatorius arba kintamojo induktyvumo ritė?**

**5. Koks yra savųjų virpesių dažnis kontūre, kurio talpa 2,2 μF, o induktyvumas 0,65 mH?**

**6. Medicinoje gydymui taikoma aukštojo dažnio elektros srovė, kurios periodas būna nuo $6{,}7 \cdot 10^{-6}$ s iki $3{,}3 \cdot 10^{-8}$ s. Apskaičiuokite jos dažnį.**

**7. Koks yra savųjų virpesių periodas ir dažnis kontūre, kurio talpa 2,2 μF, o induktyvumas 0,65 mH?**

**8. Virpesių kontūrą, kurio induktyvumas 500 μH, reikia suderinti su 1 MHz dažniu. Kokios talpos kondensatorių reikia parinkti šiam kontūrui?**

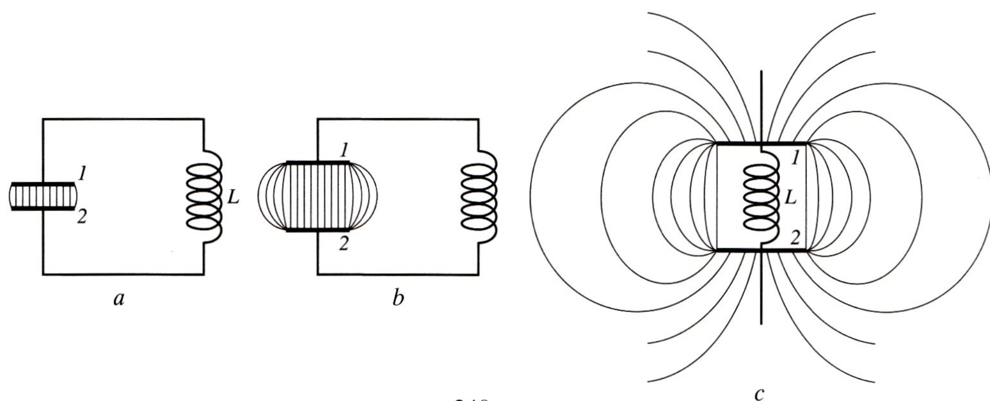
**9. Virpesių kontūre yra 0,2 μF talpos kondensatorius. Kokio induktyvumo ritę reikia įjungti į tą kontūrą, norint jame gauti 400 Hz dažnio garso virpesius?**

**10. Kokio induktyvumo ritę reikėtų sujungti su 200 pF talpos kondensatoriumi, kad kontūre per laiką $t = \pi$ μs įvyktų 50 virpesių?**

**11. Kaip pakinta laisvųjų virpesių kontūro periodas ir dažnis, kai induktyvumas sumažinamas 4 kartus, o talpa padidinama 9 kartus?**

# 103. Atvirasis virpesių kontūras. Elektromagnetinių bangų spinduliavimas

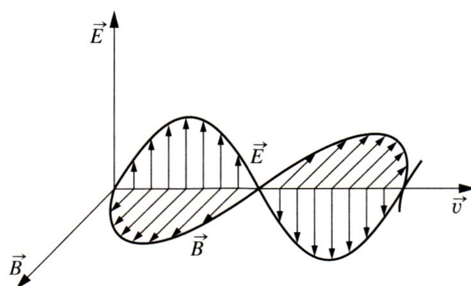
Mūsų išnagrinėtame uždarame virpesių kontūre elektrinio lauko energija virsta magnetinio lauko energija, ir atvirkščiai, o į aplinką energija beveik neišspinduliuojama. Pabandykime abi įkrauto kondensatoriaus plokšteles vieną nuo kitos atitolinti – tuomet elektrinio lauko jėgų linijos išsiplečia ir gerokai išeina iš tarpo tarp plokštelių (240 pav., *b*). O jei kondensatoriaus plokšteles praskečiame tiek, kad jų ir ritės ašis būtų vertikali tiesė, tai elektrinės jėgų linijos eina iš vienos plokštelės




240 pav.

į kitą plačiai į aplinką išsiskėtusiais lankais (240 pav., *c*). Tokios kondensatoriaus plokštelės išsikrauna per ritę; po ketvirtadalio periodo įtampa ir elektrinio lauko stiprumas tarp jų pasidaro lygūs nuliui. Buvusios tarp plokštelių elektrinės jėgų linijos pasidaro uždaros ir, kaip elektrinių jėgų linijų sūkuriai, sklinda erdvėje šviesos greičiu į visas puses. Toks išskėstas virpesių kontūras vadinamas *atvirúoju* virpesių *kòntūru*. Tokiame kontūre vykstant elektriniams virpesiams, į erdvę išspinduliuojamas kintamasis elektrinis laukas.

Pagal Dž. Maksvelo elektromagnetinio lauko teoriją, kiekvienas kintamasis elektrinis laukas sukuria aplink save kintamąjį magnetinį lauką ir, atvirkščiai, kiekvienas kintamasis magnetinis laukas sukuria kintamąjį elektrinį lauką. Atvirojo virpesių kontūro išspinduliuoti kintamieji elektrinių jėgų linijų sūkuriai sklinda kartu su magnetinės indukcijos linijų sūkuriais ir sudaro vadinamąsias *elektromagnètines bangàs*. **Elektromagnetinėje bangoje elektrinio lauko stiprumo vektorius $\vec{E}$ ir magnetinės indukcijos vektorius $\vec{B}$ yra statmeni tarp savęs ir statmeni bangų sklidimo krypčiai.** Kiekviename bangos pasiektame taške jie kinta periodiškai pagal sinuso dėsnį. 241 paveiksle parodytas momentinis elektromagnetinės bangos sklidimo grafikas ir statmenų vektorių $\vec{E}$ ir $\vec{B}$ kitimas joje. Šių vektorių kitimo amplitudės mažėja didėjant atstumui nuo atvirojo virpesių kontūro.



241 pav.

Vadinasi, atvirasis virpesių kontūras išspinduliuoja į erdvę elektromagnetines bangas, sunaudodamas joms beveik visą savo energiją. Siunčiamų radijo stočių atvirąjį kontūrą sudaro antena, indukciškai susieta su kitu uždaruoju kontūru. Pastarajame, suteikiant energiją, visą laiką palaikomi stiprūs virpesiai. Uždarojo kontūro energija perduodama induktyvumo keliu antenai, kuri ir išspinduliuoja šią energiją į erdvę elektromagnetinių bangų pavidalu.

Trumpai aptarkime, kokios yra sąlygos elektromagnetinėms bangoms plisti Žemės atmosferoje.

O. Hevisaidas (1902 m.) nustatė, kad jonosferoje yra Saulės spindulių jonizuoti elektrai laidūs oro sluoksniai. Pirmasis D sluoksnis yra apytiksliai 60 km–80 km aukštyje, antrasis E sluoksnis – 90 km–130 km aukštyje ir trečiasis F sluoksnis – 180 km–500 km aukštyje. Šie sluoksniai dažnai vadinami *Hèvisaido slúoksniais*. Didžiausia elektronų koncentracija yra F sluoksnyje ($2 \cdot 10^6$ elektronų viename kubiniame centimetre). Elektromagnetinės bangos atsispindi nuo laidžių Hevisaido sluoksnių: 500 m–100 m ilgio bangos atsispindi nuo E sluoksnio, o 100 m–10 m ilgio bangos – tik nuo F sluoksnio. Atsispindėjusios nuo Hevisaido sluoksnių, elektromagnetinės bangos gali nusklisti didesnius atstumus. Trumposios elektromagnetinės bangos (50 m – 10 m), sklindančios tik tiesia kryptimi, gali kelis kartus atsispindėti nuo jonosferos ir nuo Žemės. Taip atsispindėdamos, trumposios elek-

tromagnetinės bangos pasiekia tolimiausius Žemės paviršiaus taškus. Ilgosios elektromagnetinės bangos gali palyginus toli nusklisti išilgai Žemės paviršiaus, nes jos pasižymi savybe užlinkti už sutiktų kreivų paviršių.

Elektromagnetinių bangų magnetinio lauko stipris prie Žemės paviršiaus priklauso nuo jonosferos būvio ir todėl paros bėgyje kinta. Dienos ir nakties metu tenka parinkti skirtingus bangų ilgius, kad transliacija pasiektų tolimas Žemės vietas. Dėl jonosferos nevienalytiškumo į tą patį Žemės paviršiaus tašką gali patekti bangos, atsispindėjusios nuo skirtingų vietų, nuėjusios skirtingus kelius ir turinčios skirtingas fazes. Jų fazių nepastovumas sudaro nepastovų bangos lauko stiprį prie Žemės paviršiaus. Dėl to, klausant radijo imtuvo trumposiomis bangomis, girdime tai stipresnį, tai silpnesnį garsą, perduodamą iš tos pačios stoties, o kai fazių skirtumas pasidaro lygus $\pi$, perduodamo garso visai negirdime. Elektromagnetinės bangos, trumpesnės negu 8 m–10 m, praeina pro Hevisaido sluoksnius ir neatsispindi. Todėl televizijoje naudojamos bangos iš siunčiamosios stoties iki priėmimo vietų tiesiogiai tegali sklisti apie 100 km, o toliau jas retransliuoja tarpinės stotys. Pastaruoju metu, elektromagnetinėms bangoms atspindėti naudojant specialius dirbtinius palydovus, galima perduoti vaizdus itin dideliais nuotoliais, net į kitą Žemės rutulio pusę.

Maksvelo elektromagnetinio lauko teoriją eksperimentiškai pirmasis patikrino H. Hercas (1888 m.), atlikęs tokį bandymą. Jis prijungė prie induktoriaus antrinės apvijos du virbalus su rutuliukais, tarp kurių buvo nedidelis tarpelis elektrinei kibirkščiai šokti (*Hèrco osciliãtorius*), ir greta pastatė keturkampiu išlenktą vielos kontūrą su kibirkštiniu tarpeliu (*rezonãtorius*). Kai osciliatoriaus ir rezonatoriaus virpesių periodai parenkami vienodi, tai, šokant kibirkščiai osciliatoriuje, kartu šoka kibirkštis ir rezonatoriuje, nors atstumas tarp jų padidinamas iki 6 m.

Toliau Herco darbus tęsė rusų mokslininkas A. Popovas, kuris 1895 m. Rusijos Fizikų-chemikų draugijos Fizikų sekcijos posėdyje pademonstravo pirmąjį pasaulyje radijo imtuvą. 1896 m. Popovas pasiuntė ir priėmė radiogramą 260 m atstumu, o 1899 m. sėkmingai organizavo radijo ryšį 43 km nuotoliu. Popovo išrastu bevieliu telegrafu buvo perduodami signalai Morzės abėcėle. Jo siųstuvas buvo kibirkštinis ir siuntė gęstamus signalus. Savo siųstuve ir imtuve A. Popovas naudojo antenas.

Herco ir Popovo bandymai pagrįsti *elektrìnio rezonánso* principu. Į kintamosios srovės grandinę įjungus virpesių kontūrą, kintamoji srovė jame sukelia priverstinius elektrinius virpesius, kurių dažnis bendru atveju nesutampa su kontūro savųjų virpesių dažniu. Virpesių kontūro periodas ir savasis dažnis priklauso nuo paties kontūro savybių: induktyvumo ir talpos, o priverstinių virpesių dažnis priklauso nuo generatoriaus kintamosios evj dažnio. *Kai kontūrą, keisdami kondensatoriaus talpą, suderiname taip, kad savųjų virpesių dažnis sutaptų su priverstinių virpesių dažniu, jo priverstinių virpesių amplitudė pasidaro didžiausia, – tai ir yra elektrinio rezonanso reiškinys.*

## 104. Radijo ryšio ir televizijos samprata. Radiolokacija

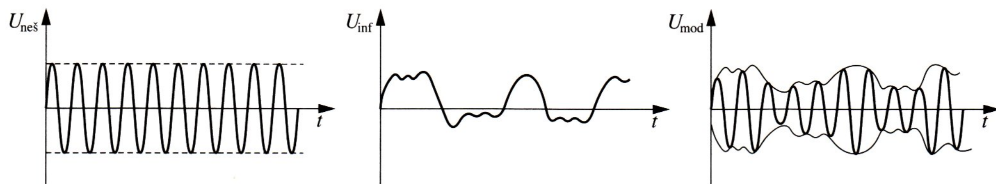
**Rãdijo ryšỹs – tai informacijos perdavimas ir priėmimas radijo, t. y. elektromagnetinėmis bangomis, kurių ilgis siekia nuo 1 mm iki 10 km** (12 lentelė). Taip perduodami kalbos, muzikos, telegrafo ir vaizdo signalai.

12 lentelė

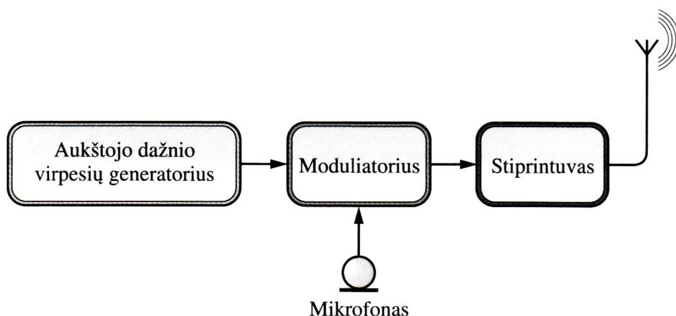
| Bangų pavadinimas | Dažnis, Hz | Bangos ilgis, m |
|---|---|---|
| Ilgosios | $3\cdot10^4$–$3\cdot10^5$ | 10 000–1 000 |
| Vidutinės | $3\cdot10^5$–$3\cdot10^6$ | 1 000–100 |
| Trumposios | $3\cdot10^6$–$3\cdot10^7$ | 100–10 |
| Ultratrumposios: | | |
| metrinės | $3\cdot10^7$–$3\cdot10^8$ | 10–1 |
| decimetrinės | $3\cdot10^8$–$3\cdot10^9$ | 1–0,1 |
| centimetrinės | $3\cdot10^9$–$3\cdot10^{10}$ | 0,1–0,01 |
| milimetrinės | $3\cdot10^{10}$–$3\cdot10^{11}$ | 0,01–0,001 |

Perduodant kalbos ir muzikos signalus, aukšto dažnio virpesiai moduliuojami (keičiami). Paprasčiausias jų keitimo būdas – **amplitùdinė moduliãcija, nešančiųjų aukštojo dažnio virpesių amplitudės keitimas informacinio signalo kitimo dažniu** (242 pav.).

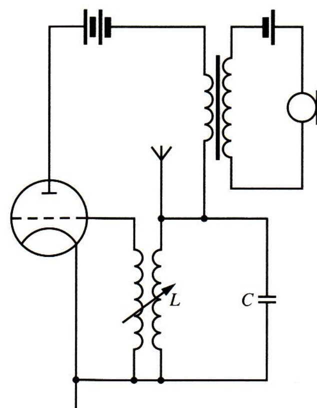
Bendroji radijo siųstuvo schema parodyta 243 paveiksle. Moduliatoriumi gali būti ir generatoriaus lempa. Iš 244 paveiksle nubraižytos schemos matyti, kaip galima įjungti mikrofoną į aukštojo dažnio virpesių generatoriaus grandinę. Sustiprintus moduliuotuosius aukštojo dažnio virpesius išspinduliuoja antena.



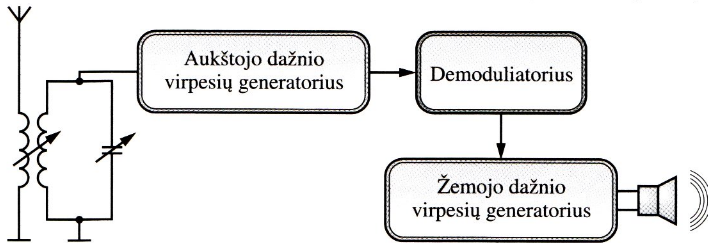

242 pav.




243 pav.



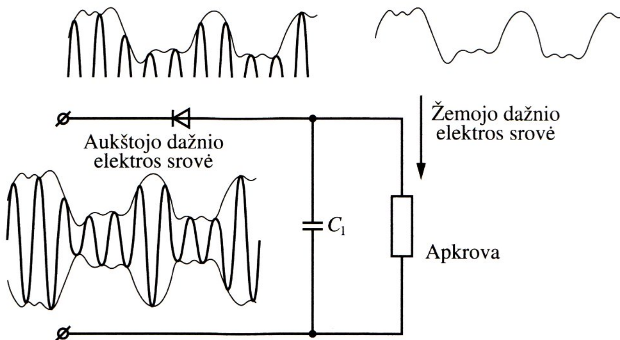

244 pav.



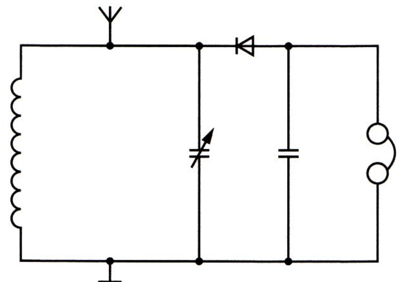

245 pav.

Kartais naudojama *dãžnio ir fãzės moduliãcija*, kurių privalumas – maža išorinių trukdymų įtaka.

Radijo imtuvo schema parodyta 245 paveiksle. Jame reikiamo dažnio virpesiai atskiriami nuo nešančiųjų virpesių. Tai atliekama sustiprintus reikiamo dažnio virpesius detektuojant, filtruojant ir demoduliuojant (246 pav.). Filtro kondensatoriaus elektrinė talpa $C_1$ parenkama tokia, kad jo talpinė varža aukštojo dažnio elektros srovei būtų maža. Todėl žemojo dažnio elektros srovė teka apkrova – garsiakalbiu, telefonu. Taip atskiriama perduota garsinė informacija.




246 pav.

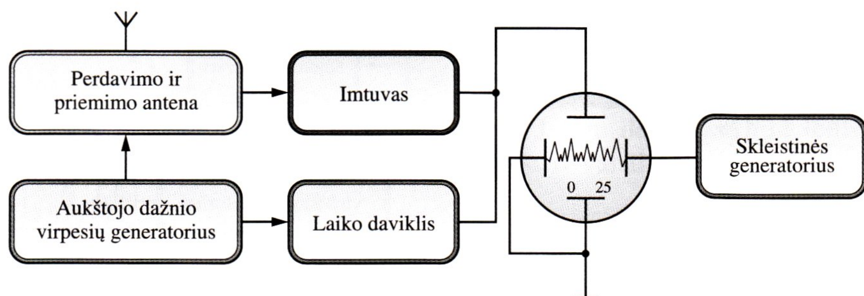


247 pav.

Taigi dabartinio imtuvo veikimo principas toks pat, kaip ir A. Popovo naudoto imtuvo, kuriuo priimami signalai irgi tik valdė elektros grandinę maitinantį energijos šaltinį.

Paprasčiausią detektorinį imtuvą sudaro *antenà, dẽrinamasis* virpesių *kòntūras, diòdas, kondensãtorius* ir *telefònas* (247 pav.). Kai signalai silpni, naudojami *lémpiniai*, arba *tranzistòriniai stiprintùvai*.

Vaizdas (televizijoje) perduodamas tokiu pačiu principu, kaip ir radijo signalai. Tik nešantieji virpesiai, kurių dažnis $f$ = (50–900) MHz, moduliuojami ne vien garso, bet ir vaizdo (šviesos) signalais. Objekto išsklaidyti šviesos signalai siųstuvo elektroniniame vamzdyje – *ikonoskopè* – paverčiami elektriniais signalais. Tokie pat signalai gaunami po detekcijos imtuve (televizoriuje). Šie vaizdo signalai reguliuoja kineskopo elektronų pluoštelio tankį, o kartu ir vaizdo atitinkamos vietos šviesumą ekrane. Kreipiančios magnetinės sistemos verčia elektronų pluoštelį bėgti ekranu puslapio skaitymo tvarka. Lygiai taip pat jis judėjo ir ikonoskopo ekranu, išelektrindamas jo mozaikos grūdelius, kurių krūvio didumas priklauso nuo šviesos srauto,




248 pav.

patenkančio į juos. Taip elektronų pluoštelis per $\frac{1}{25}$ sekundės dalį perbėga ekraną 625 kartus (ekrano eilučių skaičius). Sinchronizacijos sistemos užtikrina vaizdo stabilumą.

Kūnų aptikimo ir atstumo iki jų matavimo elektromagnetinėmis bangomis principas vadinamas *radiolokãcija*, o šio principo blokinė schema parodyta 248 paveiksle.

Perdavimo ir priėmimo antena kryptingai spinduliuoja trumpus ($10^{-6}$ s) impulsus, o laikotarpiais tarp jų ji automatiškai prijungiama prie atsispindėjusių nuo objekto signalų imtuvo. Impulso išsiuntimo ir aido priėmimo momentais ekrane matomas elektronų spindulio šoktelėjimas. Atstumas tarp šoktelėjimo taškų proporcingas atstumui iki objekto:

$$s = \frac{ct}{2}; \tag{254}$$

čia $c = 3 \cdot 10^8$ m/s; o $t$ – impulso sklidimo laikas. Oscilografo skalė sugraduota kilometrais.

*Radãras* – tai prietaisas objektams aptikti ir jų buvimo vietai nustatyti naudojant kryptingą radijo signalų spinduliavimą ir atspindėtų signalų priėmimą. Radarais tamsoje, rūke, vandenyje aptinkami ir sekami lėktuvai, laivai, automobiliai. Naudodamiesi šiais prietaisais saugiai naktimis ir per rūką skraido lėktuvai ir plaukioja laivai. Radarai seka kosminių laivų kelią. Priešlėktuvinės gynybos radarai kontroliuoja oro erdvę šimtų kilometrų nuotoliu. Radaro spindulio kryptimi galima automatiškai ir tiksliai nutaikyti raketas arba zenitinius pabūklus.

Radarais fiksuojami krintantys meteoritai, matuojamas jų greitis ir judėjimo kryptis. 1946 m. JAV ir Vengrijoje radiolokaciniais metodais buvo išmatuotas atstumas iki Mėnulio. 1961 m. Sovietų Sąjungos mokslininkai atliko Veneros radiolokaciją. Dabar jau atlikti ir kitų Saulės sistemos planetų radiolokaciniai tyrimai.

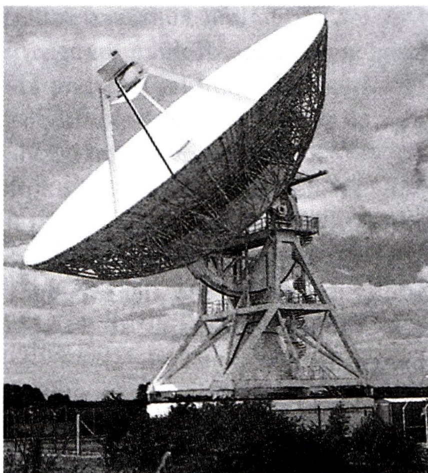
Žinių apie dangaus kūnus svarbiausias šaltinis yra jų skleidžiami šviesos spinduliai ir radijo bangos. **Astronomijos šaka, nagrinėjanti kosminių kūnų išspinduliuotas arba atspindėtas radijo bangas, vadinama radioastronòmija.** Radioastronomijos rezultatus aiškina **astrofìzika** (pažodžiui, žvaigždžių fizika) – **astronomijos šaka, fizikiniais metodais tirianti kosminių objektų sandarą, judėjimą ir cheminę sudėtį, fizikines savybes, kilmę ir evoliuciją.**

Kosminių šaltinių radijo spinduliavimas tiriamas *radioteleskòpais*. Radioteleskopai turi milžiniškus parabolinius arba sferinius veidrodžius – antenas, pagamintas

iš metalinio tinklo. Antenos sutelkia radijo bangas iš didelio ploto į vieną vietą – *žìdinį*, kuriame sumontuota antrinė antena, perduodanti radijo signalus į imtuvą.

Pirmąjį radioteleskopą kosminėms radijo bangoms tirti 1937 m. sukonstravo amerikiečių astrofizikas G. Reberis (*G. Reber*).

Radioteleskopai montuojami su judamais arba nejudamais veidrodžiais (249 pav.). Didžiausias pasaulyje radioteleskopas su nejudamu veidrodžiu yra Puerto Riko saloje. Jo 300 m skersmens antena sumontuota užgesusio ugnikalnio krateryje.



249 pav.

Radioteleskopai, turintys didelio ploto antenas, yra daug kartų jautresni už optinius teleskopus ir padeda kur kas toliau prasiskverbti į Visatą. Šiuolaikiniais radioteleskopais pastebimi objektai, nutolę nuo Žemės milijardus šviesmečių. Kadangi dalį kosminių radijo bangų sugeria atmosfera, radioteleskopai įrengiami ir kosminėse stotyse.

*Žvaĩgždės, galãktikos, kòsminiai ūkaĩ*, kuriuose nuolat vyksta įvairūs procesai, spinduliuoja radijo bangas. Šios bangos praneša apie kosmines katastrofas – sprogimus, tolimų galaktikų susidūrimus ir kt. Periodiškus radijo bangų impulsus skleidžia greitai besisukančios apie savo ašį žvaigždės *pulsãrai*. Pulsarų spinduliavimo energijos šaltinis – žvaigždės sukimosi kinetinė energija. Intensyviu radijo ir optiniu spinduliavimu pasižymi „radijo žvaigždės“ *kvazãrai*. Tai tolimiausi astronomų matomi Visatos objektai, kurių kilmė ir sandara dar nėra išaiškinta.

Radioastronomija nepaprastai praturtino kiekvieno iš mūsų žinias apie dangaus kūnus. Iš Visatos gelmių pradėta gauti nauja informacija atskleidė iki šiol nežinomas dangaus kūnų savybes. Radioastronomija padėjo atrasti naujus Visatos objektus, nustatyti galaktikų formas, tirti kosmose vykstančius fizikinius procesus. Ji turi ne vien mokslinę-pažintinę, bet ir praktinę reikšmę: pvz., pagal Saulės radiospinduliavimą numatomos magnetinės audros ir radijo ryšio sutrikimai.

## Klausimai ir užduotys

**1. Ar galima palaikyti ryšį su povandeniniu laivu, kai jis būna po vandeniu? Kodėl?**

**2. Nurodykite, kokios medžiagos gerai atspindi elektromagnetines bangas.**

**3. Kodėl automobilio radijo imtuvas blogai veikia, važiuojant po estakada arba tiltu?**

**4. Kokiu tikslu pirmą kartą buvo pritaikyta radiolokacija astronomijoje?**

**5. Kokio dažnio laisvuosius virpesius kuria kontūras, sudarytas iš 2,2 $\mu$F talpos kondensatoriaus ir 0,12 mH induktyvumo ritės?**

**6. Kokio periodo ir dažnio virpesiai vyksta radijo imtuve, veikiančiame 300 m ilgio banga?**

**7. Priėmimo kontūras sudarytas iš 2 μH induktyvumo ritės ir 1800 pF talpos kondensatoriaus. Kokiam bangos ilgiui apskaičiuotas šis kontūras?**

**8. Radijo imtuvo virpesių kontūro induktyvumas lygus 50 μH, o talpa gali kisti nuo 60 pF iki 240 pF. Kokio ilgio bangų diapazonu veikia šis imtuvas?**

**9. Kontūre sužadinami laisvieji elektromagnetiniai virpesiai. Didžiausias kontūro kondensatoriaus krūvis 1μC, amplitudinė elektros srovės stiprio vertė 10 A. Apskaičiuokite sužadintos bangos ilgį.**

**10. Virpesių kontūru tekančios srovės stipris kinta pagal dėsnį $i = 0{,}2 \cos 31{,}4\, t$. Kokio dažnio ir ilgio elektromagnetines bangas skleidžia tas kontūras?**

**11. Radiolokacijos stotis spinduliuoja 10 cm ilgio radijo bangas. Koks yra tų bangų dažnis?**

**12. Į Mėnulį pasiųstas radijo signalas atsispindėjo nuo Mėnulio ir buvo priimtas Žemėje po 2,5 s. Toks pat signalas, pasiųstas į Venerą, grįžo po 2,5 min. Apskaičiuokite atstumą nuo Žemės iki Mėnulio ir nuo Žemės iki Veneros.**

**13. Apskaičiuokite radaro veikimo nuotolį, kai elektroninio vamzdelio spindulio skleistinės trukmė 2000 μs.**

**14. Radaras kas sekundę siunčia 2000 impulsų. Nustatykite atstumą, kuriuo gali veikti šis radaras.**

# 16 SKYRIUS. RELIATYVUMO TEORIJA

## 105. Šviesos greitis vakuume – ribinis signalo perdavimo greitis

Kadangi šviesos greičio pastovumas nėra absoliučiai realus dalykas, tai pirmiausia reikėtų išsiaiškinti jį įrodančius konkrečius faktus ir tik paskui nagrinėti reliatyvumo teorijos išvadas.

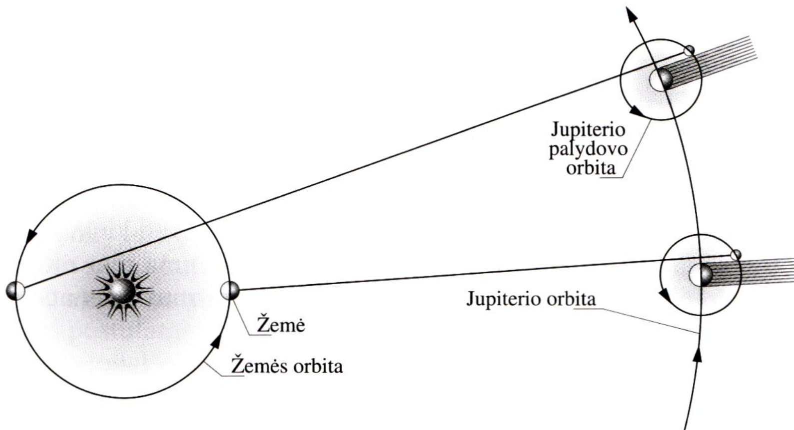
Astronomai įrodė, kad egzistuoja dvinarės žvaigždės, kurias sudaro du labai artimų viena kitai masių dangaus kūnai, besisukantys apie bendrą sunkio centrą. Yra būdų, kuriais galima išmatuoti atstumą tarp šių žvaigždžių, apskaičiuoti jų mases ir greičius bei stebėti reliatyvųjį jų judėjimą. Jeigu šviesos greitis priklausytų nuo pačios žvaigždės judėjimo greičio, tai, judant į šoną stebėtojo Žemėje atžvilgiu, šviesos greitį ir dangaus kūno judėjimo greitį reikėtų sudėti, o judant priešinga kryptimi — greičius vieną iš kito atimti. Žemėje esančiam stebėtojui atrodytų, jog šis judėjimas viena orbitos dalimi vyksta greičiau, o kita – lėčiau. Toks pats efektas būtų stebimas ir tuo atveju, jeigu dangaus kūno greitis $\vec{v}$ būtų šimtus tūkstančių kartų mažesnis už šviesos greitį $c$. Esant be galo dideliems atstumams $l$ iki šių dangaus kūnų, laikai $\frac{l}{c-v}$ ir $\frac{l}{c+v}$ bus nevienodi. Remdamiesi šiais samprotavimais, galime daryti išvadą, kad vienas šviesos spindulys aplenktų kitą. Jei taip būtų, tai mes nematytume žvaigždžių sukimosi arba šis stebimas reiškinys būtų pakankamai iškreiptas. Periodinis dvinarių žvaigždžių sukimasis galimas tik tuo atveju, jei šviesos greitis yra baigtinis greitis (ribinis greitis).

Išnagrinėkime kelis šviesos greičio matavimo metodus.

**1. Astronominis šviesos greičio matavimo metodas.** Pirmasis šviesos greitį 1676 m. išmatavo danų astronomas O. Remeris. Tai padaryti jam pavyko todėl, kad matavimams parinko labai didelius atstumus tarp Saulės sistemos planetų.

Remeris stebėjo Jupiterio, didžiausios Saulės sistemos planetos, palydovų užtemimus. Skirtingai negu Žemė, jis turi net trylika palydovų. Artimiausią Jupiterio palydovą Ijo ir stebėjo Remeris. Jis matė, kaip Ijo praslinkdavo pro planetą, patekdavo į šešėlį ir išnykdavo iš regėjimo lauko. Po kažkiek laiko jis vėl pasirodydavo lyg staiga sužibusi lemputė. Remeris išmatavo laiko tarpą tarp dviejų blykstelėjimų, kuris lygus 42 h 28 min. Pasirodo, kad šis palydovas yra didžiulis dangaus laikrodis, kuris vienodais laiko tarpais siunčia į Žemę signalus.

Iš pradžių Remeris išmatavo laiką tuo momentu, kai Žemė, skriedama apie Saulę, labiausiai priartėdavo prie Jupiterio (250 pav.). Po keleto mėnesių tokie patys matavimai rodė, kad Ijo pavėlavo išlįsti iš šešėlio net 22 min, palyginti su laiko momentu, apskaičiuotu pagal Ijo apsisukimo periodą.

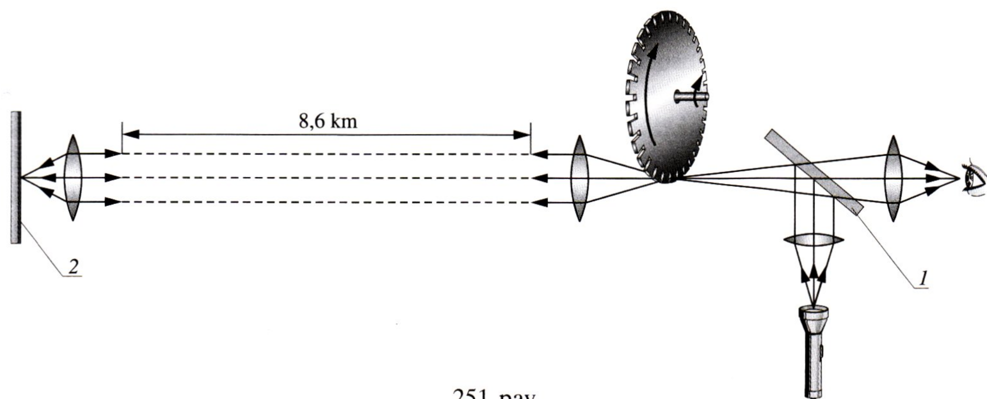



250 pav.

Palydovo vėlavimą Remeris aiškino taip: „Jeigu aš galėčiau pasilikti kitoje Žemės orbitos pusėje, tai Ijo kiekvieną kartą išeitų iš šešėlio numatytu laiku. Ten esantis stebėtojas pamatytų Ijo 22 min anksčiau. Palydovas, pasirodo, vėlavo todėl, kad praeina 22 min, kol šviesa įveikia atstumą tarp mano ankstesnės ir dabartinės padėties“. Žinant Ijo vėlavimo trukmę ir minėtą atstumą, galima apskaičiuoti šviesos sklidimo greitį (atstumą reikia padalyti iš vėlavimo trukmės). Šis greitis labai didelis – maždaug 300 000 km/s (dėl mažo matavimų tikslumo Remerio apskaičiuotas šviesos greitis buvo lygus 215 000 km/s). Iš to išplaukia, kad išmatuoti šviesos sklidimo laiką tarp dviejų Žemės taškų yra ganėtinai sunku, nes per vieną sekundę šviesa nukeliauja atstumą, kuris yra 7,5 karto didesnis už Žemės pusiaują.

**2. Laboratorinis šviesos greičio matavimo metodas.** Pirmasis šviesos greitį laboratoriniu metodu 1849 m. išmatavo prancūzų fizikas I. Fizo (*Fizeau*).

Fizo bandyme lęšis sufokusuoja šaltinio šviesą ir nukreipia ją į pusiau skaidrią plokštelę *1* (251 pav.). Atsispindėjęs nuo jos, siauras (sufokusuotas) šviesos pluoštas




251 pav.

nukreipiamas į greitai besisukančio krumpliaračio kraštą. Praėjusi tarp krumplių, šviesa krisdavo į veidrodį, esantį už keleto kilometrų nuo krumpliaračio. Atsispindėjusi nuo veidrodžio, ji, prieš patekdama į stebėtojo akį, vėl turėjo praeiti tarp krumplių. Kai ratas sukosi lėtai, atsispindėjusi nuo veidrodžio šviesa buvo matoma. Didinant sukimosi greitį, ji laipsniškai išnykdavo. Kodėl taip atsitiko?

Kol šviesa, praėjusi tarp dviejų krumplių, sklido iki veidrodžio ir atgal, ratas pasisukdavo tiek, kad krumplių tarpo vietą užimdavo krumplys. Todėl šviesa buvo nematoma.

Toliau didinant sukimosi greitį, šviesa vėl pasirodydavo. Aišku, kol šviesa pasiekdavo veidrodį ir grįždavo atgal, ratas pasisukdavo tiek, kad kiekvieną krumplių tarpą pakeisdavo gretimas. Išmatavus šį laiko tarpą ir atstumą nuo rato iki veidrodžio, galima apskaičiuoti šviesos greitį. Pagal Fizo bandymus, šis atstumas lygus 8,6 km, o apskaičiuotas šviesos greitis – 313 000 km/s.

Kiek vėliau buvo sugalvota daug įvairesnių ir tikslesnių laboratorinių šviesos greičio matavimo metodų, pvz., amerikiečių fizikas Maikelsonas sukūrė tobulą šviesos greičio matavimo metodą, vietoj rato su krumpliais pritaikęs besisukančius veidrodžius.

Kiek vėliau bandyta nustatyti šviesos sklidimo greitį įvairiose skaidriose aplinkose. 1856 m. išmatuotas šviesos greitis vandenyje. Gauta, kad vandenyje jis yra $\frac{4}{3}$ karto mažesnis negu tuštumoje. Visose kitose medžiagose greitis pasirodė esąs taip pat mažesnis negu tuštumoje.

Dabartiniais duomenimis, šviesa tuštumoje sklinda 299 792 458 (1,2) m/s greičiu. 1983 m. Generalinėje matų ir svarsčių konferencijoje buvo patvirtintas toks naujas metro apibrėžimas: „Metras – tai kelio, kurį šviesa tuštumoje nusklinda per $\frac{1}{299\,792\,458}$ s, ilgis“. Taigi tikslus šviesos greitis tuštumoje lygus 299 792 458 m/s.

Šviesos greičio nustatymas turėjo didelės reikšmės mokslui, nes padėjo išaiškinti šviesos prigimtį. Svarbu tai, kad **joks kūnas negali judėti greičiu, didesniu už šviesos greitį tuštumoje**. Visa tai pasidarė aišku, sukūrus specialiąją reliatyvumo teoriją.

## 106. Specialiosios reliatyvumo teorijos postulatai

1905 m. Albertas Einšteinas paskelbė trisdešimties puslapių mokslinį straipsnį, kuriame suformulavo specialiąją reliatyvumo teoriją (vėliau jis sukūrė ir kitą – bendrąją reliatyvumo teoriją). Tai viena svarbiausių ir gražiausių XX a. fizikos teorijų, pakeitusi požiūrį į erdvę ir laiką, masę ir energiją, išsprendusi eterio mįslę, aprašiusi kūnų judėjimą greičiais, artimais šviesos greičiui.

Niutono mechanika remiasi trimis Niutono dėsniais, o specialioji reliatyvumo teorija – dviem postulatais, kurie nėra įrodomi teoriškai, bet apibendrinami gamtos reiškinių stebėjimais. Jie formuluojami taip:

1. *Jokiais fizikos bandymais negalima atskirti rimties ir tiesiaeigio tolyginio judėjimo.*

2. *Šviesos greitis tuštumoje nepriklauso nei nuo šviesos šaltinio, nei nuo stebėtojo greičio.*

Galilėjaus teiginį, kad jokiais mechanikos bandymais, atliekamais laivo denyje, negalima atskirti, ar laivas stovi, ar plaukia tiesiaeigiai ir tolygiai, A. Puankarė (*Poincare*) ir A. Einšteinas apibendrino ir pritaikė bet kokiems fizikos reiškiniams. Pirmasis postulatas – tai **reliatyvùmo prìncipas, kuris tvirtina, jog rimtis yra reliatyvus dalykas**: kosmonautas nejuda savo raketos atžvilgiu, tačiau juda tam tikru greičiu su raketa Saulės atžvilgiu, kitokiu greičiu – Galaktikos centro atžvilgiu, ir jokiais išmoningais fizikos bandymais, atliekamais erdvėlaivio viduje, negalima nustatyti, kokiu pastoviu greičiu jis juda iš tikrųjų ir apskritai ar jis juda (prisiminkime, jog žodis „reliatyvus" reiškia santykinis, neabsoliutus).

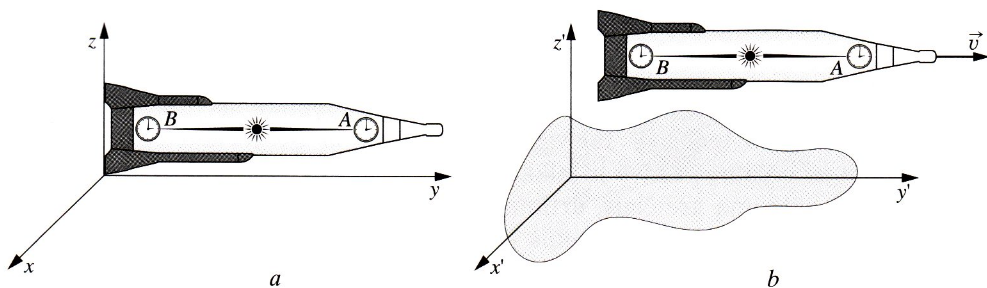
Reliatyvumo teorijoje dažnai vartojama sąvoka *atskaitõs sistemà*, reiškianti koordinačių sistemą, kuri patogumo dėlei nejudamai susiejama su raketa ar kitu kūnu. Be to, atskaitos sistemoje kūnų judėjimui nagrinėti naudojamas laikrodis. Taigi pirmasis postulatas griežčiau formuluojamas šitaip: **fizikos dėsniai yra vienodi visose atskaitos sistemose, judančiose viena kitos atžvilgiu tiesiai ir tolygiai**.

Reikia pabrėžti, kad specialioji reliatyvumo teorija nagrinėja tik tiesiai ir tolygiai judančias sistemas, o judančios su pagreičiu atskaitos sistemos yra įvedamos tik bendrojoje reliatyvumo teorijoje.

*Jeigu nėra vienos išskirtinės atskaitos sistemos, tai nėra ir eterio.* Padaręs tokią logišką išvadą, A. Einšteinas atmetė eterio egzistavimą kaip nereikalingą hipotezę.

Antrasis postulatas apibendrina bandymų rezultatus, kurie parodė, kad šviesos greitis yra vienodas, matuojant jį Žemės judėjimo kryptimi ir priešinga jos judėjimui kryptimi. Tiesa, A. Einšteinas teigė, esą, kurdamas teoriją, jis rėmęsis savo įsivaizduojamais bandymais. Pavyzdžiui, ką matytų stebėtojas, „jodamas raitas" ant šviesos spindulio, t. y. pats judėdamas šviesos greičiu. Tokiu būdu, gavęs neįtikėtiną rezultatą, A. Einšteinas padarė išvadą, kad šviesos greitis neturi keistis priklausomai nuo stebėtojo greičio.

Tie du reliatyvumo teorijos postulatai daugeliui tikriausiai nepasirodė labai keisti ir neįprasti. Tačiau, jais remiantis, gaunamos paradoksalios išvados, keičiančios mums įprastą požiūrį į erdvę, laiką, energiją bei kitas pagrindines fizikos sąvokas ir daugeliui žadinančios norą prieštarauti ar net abejoti specialiąja reliatyvumo teorija. Deja, čia negalime pateikti nuoseklių įrodymų, tad išnagrinėsime tik paprastą pavyzdį, rodantį, kaip iš „normalių" principų gaunamos paradoksalios išvados.




252 pav.

Tarkime, kad tolygiai iš inercijos skrendančios raketos viduje staiga įsižiebia elektros lemputė, patalpinta kabinos viduryje vienodu atstumu nuo jos galų *A* ir *B* (252 pav.). Kosmonautas stebi šį reiškinį savo atskaitos sistemoje, susietoje su raketa, ir padaro logišką išvadą, kad šviesa abu kabinos galus *A* ir *B* pasieks vienu laiku. Tuo tarpu kitas stebėtojas, esantis ant asteroido, pro kurį tuo metu skrieja raketa, naudoja atskaitos sistemą, susietą su tuo asteroidu. Pagal antrąjį reliatyvumo postulatą, šviesa sklinda asteroido atžvilgiu irgi tuo pačiu pastoviu greičiu ir vejasi tolstantį raketos priekį, o raketos galas juda priešpriešiais šviesai. Tad ant asteroido esančio stebėtojo atžvilgiu šviesa pasieks kabinos galą *B* anksčiau negu kabinos priekį *A*.

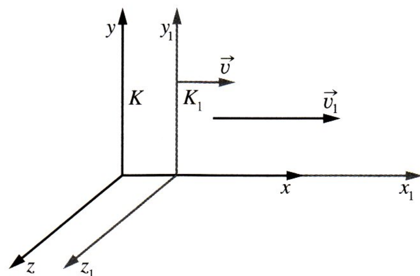
Šiame pavyzdyje nėra jokios klaidos. Išvada, kad du skirtingose vietose vykstantys įvykiai gali būti vienalaikiai vieno stebėtojo požiūriu ir būti nevienalaikiai kito stebėtojo, judančio pirmojo stebėtojo atžvilgiu tam tikru greičiu, požiūriu, nuosekliai išplaukia iš pagrindinių principų. O išvados prieštaravimas sveiko proto požiūriui negali būti rimtas argumentas; juk kažkada ne mažiau keistos atrodė mokslo išvados, kad žmonės kitoje Žemės rutulio pusėje vaikšto aukštyn kojomis arba, kad sukasi Žemė, o ne Saulė.

## 107. Reliatyvistinis greičių sudėties dėsnis

Naują požiūrį į laiką ir erdvę atitinka ir *reliatyvìstinis greĩčių sudėtiẽs dė́snis*. Aišku, klasikinis greičių sudėties dėsnis čia netinka, nes pagal jį šviesos greitis tuštumoje nėra pastovus.

Jeigu traukinys juda greičiu $\vec{v}$ ir vagone traukinio judėjimo kryptimi greičiu $c$ sklinda šviesos banga, tai, remiantis reliatyvistiniu greičio sudėties dėsniu, jos greitis Žemės atžvilgiu taip pat turi būti $c$, o ne $v + c$.

Tarkime, kūnas juda atskaitos sistemos $K_1$ ašimi $x_1$. Be to, sistema $K_1$ juda greičiu $\vec{v}$ sistemos $K$ atžvilgiu. Ašys $x$ ir $x_1$ visą laiką sutampa, o ašys $y$ ir $y_1$, $z$ ir $z_1$ yra lygiagrečios (253 pav.).




253 pav.

Pažymėkime kūno greitį $\vec{v}_1$ sistemos $K_1$ atžvilgiu, o $\vec{v}_2$ – to kūno greitį sistemos $K$ atžvilgiu. Tada reliatyvistinis greičių sudėties dėsnis užrašomas taip:

$$v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + \frac{v_1 v}{c^2}}. \qquad (255)$$

Išnagrinėkime atskirus 255 lygties taikymo atvejus:

1) Kai $v << c$ ir $\vec{v}_1 << c$, tai narys $\frac{v_1 v}{c^2} << 1$. Akivaizdu, kad ši lygtis tampa klasikine greičių sudėties lygtimi: $v_2 = v_1 + v$.

2) Kai $v_1 = c$, tai ir $v_2$ turėtų būti lygus $c$ (nes to reikalauja antrasis reliatyvumo teorijos postulatas). Įrašę šią reikšmę, patikrinkime 255 lygtį: $v_2 = \frac{c+v}{1+\frac{cv}{c^2}} = \frac{c+v}{\frac{c^2+cv}{c^2}} = c$. Gauname, kad $v_2 = c$. Tai ir reikėjo įrodyti!

3) Reliatyvistinis greičių sudėties dėsnis pasižymi nuostabia savybe: nesvarbu, kokie bebūtų greičiai $v_1$ ir $v$ (žinoma, mažesni už $c$), greitis $v_2$ visada bus mažesnis už šviesos greitį ($v_2 < c$).

4) Galimas ribinis atvejis, kai $v_1 = v = c$. Tada gauname, kad $v_2 = \frac{c+c}{1+\frac{c^2}{c^2}} = c$; $v_2 = c$.

Šis rezultatas parodo, kad greitis yra vienodas visiems stebėtojams.

Remdamiesi minėtais samprotavimais, galime teigti, kad **negali būti greičio $v$, didesnio už šviesos greitį $c$ ($v \ngtr c$).**

Jeigu $v > c$, tai ilgio ir laiko tarpų reliatyvumo formulės netenka prasmės, kadangi ilgis ir laikas pasidaro menami (tai aptarsime §108).

## Klausimai ir užduotys

**1. Kosminis laivas tolsta nuo Žemės reliatyvistiniu greičiu, lygiu 0,75 *c*, o iš jo ta pačia kryptimi greičiu 0,75 *c* laivo atžvilgiu paleidžiama raketa. Kam lygus raketos greitis Žemės atžvilgiu?**

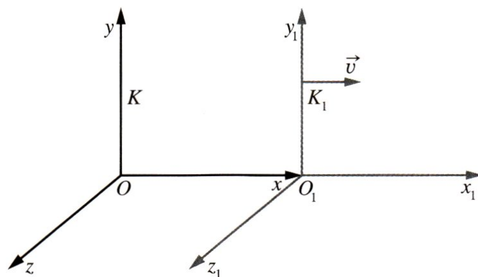
# 108. Ilgio ir laiko tarpų reliatyvumas

Ilgis nėra absoliutus dydis. Jis priklauso nuo kūno judėjimo greičio pasirinktos atskaitos sistemos atžvilgiu (254 pav.).

Strypo ilgį sistemos $K$, kurioje jis nejuda, atžvilgiu pažymėsime $l_0$. Tada strypo ilgis $l$ sistemoje $K_1$, kurios atžvilgiu strypas juda greičiu $\vec{v}$, nusakomas formule:

$$l = l_0\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \qquad (256)$$

Iš 256 formulės matyti, kad $l < l_0$, todėl galime daryti išvadą, jog **atskaitos sistemose, judančiose greičiais, artimais šviesos greičiui, kūnų ilgis mažėja**. Tai vadinama *reliatyvìstiniu* kūnų *susitraukimù*.




254 pav.

Reliatyvųjį daugiklį $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ pažymėkime $\sqrt{1-\beta^2}$. Tuomet

a) kai $v << c$ ($v$ labai mažas palyginti su $c$), tai vietoj šio daugiklio galima naudoti jam ekvivalenčias išraiškas:

$$\sqrt{1-\beta^2} \approx 1-\frac{1}{2}\beta^2 \quad \text{arba} \quad \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \approx 1+\frac{1}{2}\beta^2;$$

b) kai $v = c$ ($v$ ir $c$ lygūs, t. y. $\beta \approx 1$), tai $\sqrt{1-\beta^2} \approx \sqrt{2(1-\beta)}$.

Tarkime, kad laiko tarpas tarp dviejų įvykių, įvykusių viename inercinės sistemos $K$ taške, lygus $\tau_0$ (šiais įvykiais gali būti du metronomo dūžiai).

Laiko tarpas $\tau$ tarp šių įvykių sistemoje $K_1$, judančioje greičiu $\vec{v}$ sistemos $K$ atžvilgiu, yra toks:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}. \quad (257)$$

Iš šios formulės išplaukia, kad $\tau > \tau_0$, o tai reiškia, kad **atskaitos sistemose, judančiose greičiais, artimais šviesos greičiui, laiko tėkmė sulėtėja**. Be to, kai $v << c$, tai formulėse (256 ir 257) $\frac{v^2}{c^2} \approx 0$ (jo galima nepaisyti) ir iš 257 formulės gauname, kad $\tau \approx \tau_0$ ir $l \approx l_0$. Tai reiškia, kad reliatyvistinio kūnų sutrumpėjimo ir laiko sulėtėjimo judančioje atskaitos sistemoje galima nepaisyti. Vadinasi, galima teigti, jog bet kuriam stebėtojui atrodo, kad jo atžvilgiu judantis laikrodis eina lėčiau, negu toks pats laikrodis, tik nejudantis jo atskaitos sistemoje.

**Dvynių paradoksas.** Tarkime, gyvena dvyniai Elas ir Bobas. Bobas yra astronautas. Jis iškeliauja į žvaigždę, esančią už 10 *šviẽsmečių* (žymima ly; 1 ly = = $9{,}46 \cdot 10^{15}$ m = $9{,}46 \cdot 10^{12}$ km), o Elas lieka Žemėje. Jei Bobo erdvėlaivis skrieja greičiu $v = 0{,}99c$ Žemės atžvilgiu, tai pagal Elo laikrodį ši kelionė užtruks (kadangi 1 šviesmečio nuotolį šviesa nueina per 1 metus, tai dydis $\frac{1\text{ ly}}{c}$ yra lygus 1 metams):

$$\Delta t = \frac{10\text{ ly}}{v}; \quad \Delta t = \frac{10\text{ ly}}{0{,}99c}; \quad \Delta t = 10{,}10101 \text{ metų}; \quad \Delta t \approx 10 \text{ metų}.$$

Kadangi grįžimui sugaištama tiek pat laiko, tai, kol Bobas grįš į Žemę, Elas pasens 20 metų.

Tačiau Bobui erdvėlaivyje atrodo, kad Žemė ir žvaigždė juda jo atžvilgiu greičiu, lygiu 0,99$c$, ir atstumas nuo Žemės iki žvaigždės bus:

$$l = 10\ \text{ly}\sqrt{1 - \frac{0{,}99c^2}{c^2}} = 10\ \text{ly}\sqrt{1{-}0{,}9801} = 10\ \text{ly}\sqrt{0{,}0199};\ l = 10\ \text{ly} \cdot 0{,}1410673 \approx 1{,}4\ \text{ly};$$

$l \approx 1{,}4$ ly.

Taigi, pagal Bobo laikrodį, kelionė į žvaigždes užtrunka tik 1,4 metus, ir jis grįžta į Žemę pasenęs 2,8 metais. Sveikindamasis su broliu, Bobas pastebi, kad jo dvynys **yra 20 – 2,8 = 17,2 metais vyresnis už jį**!

Tačiau mes žinome, kad bet koks judėjimas yra reliatyvus. Vadinasi, stebint šią kelionę iš Bobo atskaitos sistemos, atrodo, kad keliavo Elas su Žeme. Todėl Elo laikrodis turėtų eiti lėčiau už Bobo laikrodį, ir kai Elas (kartu su Žeme) grįš iš savo „kelionės“ ir susitiks su broliu, Bobas turėtų pastebėti, kad jo dvynys yra už jį jaunesnis. Štai ir paradoksas!

Šis paradoksas pagrįstas tariama brolių simetrija. Atrodytų, nesvarbu, kuris iš brolių išvyks į kelionę, o kuris liks namie. Bet iš tikrųjų tai svarbu, nes Elas (namisėda) visą laiką yra inercinėje atskaitos sistemoje, o Bobas (keliautojas) patiria pagreičius. Palikdamas Žemę, Bobas judėjo su pagreičiu, kol pasiekė greitį, lygų 0,99 $c$, paskui judėjo su pagreičiu, sukdamasis aplink Žvaigždę, ir pagaliau, grįždamas į Žemę, jo laivas turėjo lėtėti, kol nutūpė (judėjo su pagreičiu). Taigi Elo ir Bobo judėjimas nėra simetriškas. Kadangi ne visos atskaitos sistemos yra inercinės, reliatyvus jų judėjimas analizuojamas itin kruopščiai. Naudojantis specialiosios reliatyvumo teorijos principais, paaiškėjo, kad Bobas sens lėčiau negu jo dvynys brolis.

Laiko sulėtėjimas padeda įsivaizduoti nuostabią kelionių į tolimas žvaigždes galimybę. Skriedamas greičiu, artimu šviesos greičiui, keliautojas be vargo įveiks milžiniškus kosminius atstumus per laiką, pakankamai trumpą palyginti su jo amžiumi. Bet jis grįš į visiškai kitą Žemę, kurioje per tą laiką, kol jo nebuvo, praeis šimtai ir netgi tūkstančiai metų. Žinoma, šis fantastiškas sumanymas turi trūkumų. Šiandien mes dar neįsivaizduojame, kaip gauti pakankamą energijos kiekį, būtiną erdvėlaiviui pagreitinti iki greičio, artimo šviesos greičiui $c$!

**„Dvynių paradokso“ išvados:** 1. „Dvynių paradoksas“ – realus reiškinys, nes keliaujantis dvynys sensta lėčiau negu Žemėje likęs jo brolis. 2. Keliautojas nieko nelaimi iš savo ilgaamžiškumo, nes visi biologiniai procesai jo organizme vyksta taip pat lėčiau negu Žemėje, todėl jo veiksmai ir mintys taip pat sulėtėja.

## Klausimai ir užduotys

**1. Stebėtojas juda pro metrinę liniuotę greičiu, lygiu pusei šviesos greičio. Kokį liniuotės ilgį jis išmatuos?**

**2. Tarkime, kad stebėtojo greitis metrinės liniuotės atžvilgiu ankstesniajame uždavinyje sumažėjo iki 30 m/s (apie 100 km/h). Kokį liniuotės ilgį jis išmatuos dabar?**

## 109. Masės priklausomybė nuo greičio

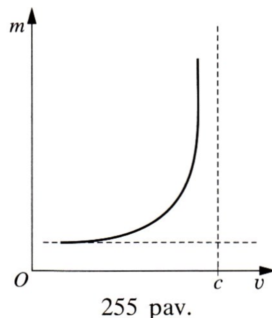
Kūnams judant mažais greičiais, antrojo Niutono dėsnio $\vec{F}=m\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$ forma nepakinta pakeitus vieną inercinę atskaitos sistemą kita (galioja reliatyvumo principas). Tačiau dideliu greičiu judantiems kūnams šis (klasikinis) dėsnio formulavimas yra neteisingas, nes jėga, veikdama kūną ilgą laiką, gali suteikti jam be galo didelį greitį. Tačiau **šviesos greitis vakuume yra ribinis greitis, ir kūnas niekada negali judėti didesniu greičiu, negu šviesa sklinda vakuume.**

Į šį dėsnį įveskime pataisas ir užrašykime jį taip, kaip rašė pats Niutonas: $\frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}=\vec{F}$; čia $\vec{p}=m\vec{v}$ – judesio kiekis; $m$ – masė (ji šioje lygtyje laikoma pastovia) (žr. § 22).

Kūnams, judantiems greičiais, artimais šviesos greičiui $c$, antrasis Niutono dėsnis užrašomas ta pačia lygtimi.

Skirtumas yra tas, kad masė nėra pastovus dydis. Ji priklauso nuo kūno judėjimo greičio. Iš 255 paveikslo matyti, kad, didėjant greičiui, masė didėja ir apskaičiuojama pagal formulę:

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}; \qquad (258)$$



255 pav.

čia $m_0$ – kūno rimties masė, kai $v = 0$.

Iš 258 formulės matyti, kad kai $v \ll c$, narys $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ labai mažai skiriasi nuo vieneto. Pvz., dabartinės kosminės raketos, judančios greičiu $v \approx 10$ km/s, narys $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = 0{,}99999999944$, todėl nenuostabu, kad neįmanoma pastebėti (mažu greičiu judančio) kūno masės pakitimo.

Kai $v \to c$, masė neribotai didėja ($m \to \infty$). Todėl, nors ir veikia jėga, kūno pagreitis praktiškai nedidėja. Vadinasi, nė viena dalelė, kurios $m_0 \neq 0$, negali judėti šviesos greičiu vakuume. Pvz.: a) jeigu dalelės greitis tik 90 km/s mažesnis už šviesos greitį tuštumoje, tai dalelės masė yra padidėjusi 40 kartų; b) kadangi galinguose greitintuvuose elektronų greičiai tik 35–40 km/s mažesni už $c$, tai elektronų masė padidėja 2000 kartų ir viršija protonų masę. Kad toks elektronas judėtų apskritimine orbita, magnetinis laukas jį turi veikti 2000 kartų didesne jėga negu nepakitusios masės elektroną. Todėl Niutono mechanikos dėsniai labai greitų dalelių trajektorijoms apskaičiuoti netinka.

Niutono mechanikos dėsnius galima taikyti tik atskiru atveju, kai kūnai juda greičiu, daug kartų mažesniu už šviesos greitį tuštumoje.

Remdamiesi formule $\vec{p}=m\vec{v}$, užrašykime kūno impulsą:

$$\vec{p}=\frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (259)$$

Reliatyvistinio judėjimo lygtis būtina taikyti kuriant elektringųjų dalelių greitintuvus. Taigi šiuo metu reliatyvumo teorija tapo inžineriniu mokslu.

## Klausimai ir užduotys

**1. Kokiu greičiu juda elementarioji dalelė, kurios masė yra 10 kartų didesnė už rimties masę?**

**2. Kam lygus 1000 km/h greičiu skrendančio reaktyvinio lėktuvo santykinis masės padidėjimas?**

# 110. Masės ir energijos sąryšio dėsnis

Masės ir energijos sąryšio dėsnis – tai svarbiausia reliatyvumo teorijos išvada, plačiai taikoma branduolio ir elementariųjų dalelių fizikoje.

Šis sąryšis išplaukia iš energijos tvermės dėsnio ir kūno masės priklausomybės nuo jo judėjimo greičio.

Kai $v << c$, tai lygybę $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ galima užrašyti apytiksliai taip: $m \approx m_0\left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)$. Padauginę abi lygties puses iš $c^2$, gauname: $mc^2 \approx m_0c^2 + \frac{1}{2}m_0v^2$. Iš šios lygybės matyti, kad narys $\frac{1}{2}m_0v^2$ yra kinetinė energija (pagal klasikinę teoriją), o narys $m_0c^2$ yra susijęs su kažkokia vidine kūno savybe, nes jis priklauso tik nuo rimties masės, ir vadinamas kūno *rimtiẽs enèrgija*.

**Kiekvienas kūnas turi energijos, kuri proporcinga jo rimties masei $m_0$, vien todėl, kad jis egzistuoja.**

**Rimtiẽs enèrgijos ir judė́jimo (t. y. kinètinės) enèrgijos suma sudaro pilnutìnę kū́no enèrgiją**:

$$mc^2 = m_0c^2 + E_k; \tag{260}$$

čia $mc^2$ – kūno pilnutinė energija, $m_0c^2$ – rimties energija, $E_k$ – kinetinė energija.

260 lygtis išreiškia Einšteino nustatytąjį masės ir energijos ryšį:

$$E = mc^2; \tag{261}$$

čia $E$ – pilnutinė (savoji ir kinetinė) kūno energija, $m$ – kūno masė, $c$ – šviesos greitis.

Iš 261 lygties matyti, kad pilnutinė energija yra proporcinga kūno masei. Vadinasi, *pakitus kūno ar sistemos energijai, pakinta ir jo masė, ir atvirkščiai*:

$$\Delta E = \Delta mc^2. \tag{262}$$

Ši lygtis išreiškia branduolinės energijos gavimo esmę: **kintant branduolio masei, išsiskiria energija**. Atominei energijai gauti elementų branduoliai ne tik skaldomi, bet ir sujungiami.

Taigi masė ir energija nėra nepriklausomi dydžiai, kaip ilgą laiką buvo manoma. Dar daugiau – tie dydžiai yra ekvivalentūs, nes skiriasi tik konstanta (tiesa, ta konstanta ($c^2$) turi dimensiją). Branduolio ar elementariųjų dalelių fizikoje masės dažnai nurodomos energijos vienetais. O iš tikrųjų vietoj masės ir energijos galima naudoti tik vieną dydį – energiją (fizikinė jos prasmė bendresnė).

Iš 261 formulės išplaukia labai svarbi ir įdomi išvada, kad **nejudantis kūnas turi didžiulę energiją**, kurią galima rasti pagal formulę $E_0 = m_0c^2$, čia $m_0$ – kūno rimties masė. Nesunku apskaičiuoti, kad viename grame medžiagos slypi apie $10^{18}$J energijos. O tai yra daugiau, negu per metus pagamina Ignalinos atominė elektrinė. Tiesa, gamta paslėpė tą energiją už devynių užraktų, ir ją ne taip paprasta atrasti ir mokėti panaudoti.

Fizikai energiją suvokia kaip lengvai panaudojamą jos dalį, – be rimties energijos, o mase apibūdina tik nejudančio kūno masę. Dėl to kartais teigiama, jog branduolinių ar elementariųjų dalelių reakcijų metu masė virsta energija, nors iš tikrųjų – tai rimties energija virsta įprastinėmis energijos rūšimis.

## Klausimai ir užduotys

**1. 1 g vandens suteikiama 41,9 J šilumos. Kiek padidėjo vandens masė?**

**2. Protono kinetinė energija 2 kartus didesnė už jo rimties energiją. Kam lygus protono greitis?**

**3. Saulės spinduliavimo galia 3,86 · $10^{26}$ W. Kiek sumažėja Saulės masė per 1s? Per kiek laiko ji sumažėja 1%?**

**4. Reliatyvusis protono masės padidėjimas neturi viršyti 5%. Iki kokios energijos galima pagreitinti protoną?**

**5. Elektronas perlėkė jį greitinantį elektrostatinį lauką. Dėl to jo masė padidėjo 2 kartus. Kam lygus to lauko potencialų skirtumas?**

# 111. Specialiosios reliatyvumo teorijos eksperimentinis patikrinimas ir pažintinė jos reikšmė

Paradoksalios reliatyvumo teorijos išvados yra patikrintos daugybe eksperimentų ir ganėtinai dideliu tikslumu. Greičiai, artimi šviesos greičiui, yra įprasti elementariųjų dalelių pasaulyje, todėl daugelis bandymų yra atlikti su šiomis dalelėmis, ir eksperimento paklaidų ribose jų rezultatai visada sutampa su reliatyvumo teorijos išvadomis. Be šios teorijos būtų neįmanoma konstruoti elementariųjų dalelių greitintuvų. Atradus ryšį tarp masės ir energijos, atsirado galimybė sukurti atomines elektrines ir, deja, atominę bombą. Tad įvairių „atradėjų“ bandymai paneigti ar ištaisyti specialiąją reliatyvumo teoriją, pasitaikantys net šiais laikais, pasmerkti tokiam pat likimui, kaip ir bandymai sukurti „amžinąjį variklį“.

Verta dar kartą pabrėžti, kad reliatyvumo teorija nepaneigė klasikinės mechanikos – tik nustatė jos taikymo ribas: klasikinė fizika ir toliau puikiai galioja mums įprastoje srityje, kai kūnų judėjimo greičiai yra daug mažesni už šviesos greitį.

Pagal savo darbų reikšmę fizikai, filosofijai ir bendram pasaulio suvokimui genialusis reliatyvumo teorijos kūrėjas Albertas Einšteinas yra žymiausias XX a. mokslininkas. Jis gimė 1879 m. Ulmo mieste, pietų Vokietijoje prie Dunojaus upės. Jo protėviai, žydų amatininkai ir prekybininkai, apsigyveno šiame krašte maždaug prieš tris šimtus metų, čia asimiliavosi ir laikė save vokiečiais. Vaikystėje Einšteinui

didžiausią įspūdį padarė trys įvykiai: tėvo padovanotas kompasas, kai jam buvo 4–5 metai, geometrijos vadovėlis, kurį 12 metų Albertas išstudijavo savarankiškai, ir po metų perskaityta daugiatomė knygų serija „Gamtos mokslų knygos visiems", kurioje jis sužinojo apie šviesos greitį ir kitus fizikinius reiškinius.

Vaikystėje A. Einšteinas nebuvo vunderkindas ir nedaug skyrėsi nuo bendraamžių. Tėvo elektrotechnikos reikmenų dirbtuvėje jis priprato prie technikos ir 1896 m. įstojo į Ciuricho politechnikumą (Aukštąją technikos mokyklą). Ją baigęs ir tapęs fizikos mokytoju, dvejus metus negavo pastovaus darbo. Tik 1902 m. A. Einšteinui pasisekė tapti ekspertu patentų biure Berne. Čia dirbdamas, 1905 m. A. Einšteinas atliko tris svarbius mokslinius darbus. Pirmajame jis teoriškai aprašė Brauno judėjimą, kaip chaotišką mažų dalelių judėjimą skystyje (tai pirmasis tiesioginis molekulių egzistavimo įrodymas). Antrajame darbe Einšteinas sukūrė fotoefekto teoriją, įvedė šviesos kvanto ir fotono sąvokas. Praslinkus 17 metų, už šį darbą jam buvo suteikta Nobelio premija. Trečiajame darbe jis suformulavo specialiąją reliatyvumo teoriją.

Po to (maždaug dešimt metų) A. Einšteinas atkakliai kūrė bendrąją reliatyvumo teoriją, apibendrinusią Niutono visuotinės traukos dėsnį ir nustačiusią ryšį tarp erdvės, laiko ir medžiagos. Tuo metu jis jau buvo universiteto profesorius, kuris savo darbais pelnė ne tik fizikų, bet ir visuomenės dėmesį. Apie 1920 m. A. Einšteinas tapo pasaulio įžymybe, o apie jį ir jo keistas teorijas nuolat rašė įvairių šalių laikraščiai ir žurnalai, jam buvo skiriami įvairūs apdovanojimai ir premijos. Visa tai nepakeitė A. Einšteino pažiūrų bei gyvenimo būdo – jis ir toliau liko paprastas, nuoširdus, jaunatviškai smalsus, ignoravo visokius formalumus ir mokslo sferose priimtus sąlyginumus. Mokslininko 50-mečio proga Berlyno magistratas padovanojo jam miško sklypą ant ežero kranto. Ten A. Einšteinas pasistatė erdvią vilą ir dažnai plaukiodavo po ežerą savo jachta. Iširus pirmajai santuokai su studijų drauge, A. Einšteinas vedė savo pusseserę, slaugiusią jį ligos metu.

A. Einšteino mokslinis metodas buvo kitoks negu to meto jo bendražygių. Mokslininkas didžiausią dėmesį skyrė nuosekliai mokslinei ir net filosofinei problemos analizei, po to – mintiniam eksperimentui ir galiausiai – problemos visumos suvokimui, tarsi jos regimojo vaizdo sudarymui.

Ilgus metus (iki pat mirties) Einšteinas kūrė visuotinę lauko teoriją, vienijančią visas gamtos jėgas, tačiau šios superproblemos neįveikė net jo genialus protas, ji neišspręsta ligi šiol. 1955 m. mokslininkas mirė.

Kartą A. Einšteinas parašė garsiam aktoriui Č. Čaplinui: „Jūs visiems žinomas todėl, kad visi jus supranta". Č. Čaplinas atsakė: „Jūs visiems žinomas todėl, kad niekas jūsų nesupranta". Iš tikrųjų A. Einšteinas ir jo reliatyvumo teorija yra tapę šiuolaikinės civilizacijos simboliais, išreiškiančiais eilinį žmogų stebinančią ir bauginančią mokslo galią, jo nesuprantamumą bei keistumą.

Specialioji reliatyvumo teorija, skirtingai nuo bendrosios reliatyvumo teorijos, nėra labai sudėtinga, bet neprofesionalui tai – intelektinis Everestas. Kitų sričių mokslininkus, menininkus bei visuomenę veikia ne tiek tikrieji šios teorijos atradimai, kurie dažnai suvokiami labai supaprastintai ir net naiviai iš populiarių perpa-

sakojimų, kiek bendros pažintinės idėjos, išplaukiančios iš reliatyvumo teorijos. Jos pasiekia visuomenę daugiausia per filosofiją. Tarp filosofijos, kuri formuoja bendrą pažiūrų į pasaulį ir žmogų sistemą, ir fizikos, tiriančios bendriausius gamtos dėsningumus, nuo seno yra glaudus ryšys. Daugelis filosofų pripažįsta, kad būtent šiuolaikinė fizika suteikia filosofijai daug naujų impulsų, bendrų pažintinių idėjų. Šiuo požiūriu viena iš vaisingiausių yra reliatyvumo teorija.

Niutono mechanika kėlė mintį, kad viskas gamtoje yra griežtai sąlygota ir racionalu, o Einšteino teorija kelia reliatyvumo ir tikrovės paradoksalumo idėjas. Reliatyvumo teorija atskleidžia, kad netgi tokios fundamentalios sąvokos, kaip erdvė ir laikas, nėra absoliučios, kad jų suvokimas priklauso nuo atskaitos sistemos parinkimo, nuo stebėtojo požiūrio. Kiekvienas stebėtojas turi savo tiesą ir nėra vieno absoliučiai teisingo požiūrio. Vis dėlto iš šios teorijos išplaukiantis reliatyvizmas neveda į skepticizmą: kiekvieno stebėtojo požiūris yra griežtai apibrėžtas ir egzistuoja vienareikšmiai ryšiai tarp įvairių stebėtojų požiūrių. Be to, verta pabrėžti, kad net reliatyvumo teorijoje yra absoliučių, nekintamų dydžių, vienodų visiems stebėtojams, tokių kaip šviesos greitis ar atstumas tarp dviejų taškų keturmatėje erdvėje. O fizikos dėsniai yra vienodi visose atskaitos sistemose, judančiose viena kitos atžvilgiu pastoviu greičiu.

Reliatyvumo teorija labai akivaizdžiai parodė, kad net bendriausieji gamtos dėsniai galioja tam tikrose ribose. Dėsniai, aprašantys mūsų suvokiamą pasaulio dalį, gali pasidaryti visai neteisingi tolimesnėse, neištirtose srityse. Pasaulis yra daug sudėtingesnis, negu atrodo remiantis ribota patirtimi, ypač – vadinamuoju sveiku protu. Gamtos dėsningumai iš esmės keičiasi kintant greičiams, energijoms ir kitiems dydžiams bei reiškinių masteliams.

Šios idėjos turi svarbią pažintinę reikšmę. Aišku, ir jų negalima taikyti absoliučiai visose srityse. Antai iš fizikos sąvokų reliatyvizmo jokiu būdu neišplaukia moralinis reliatyvizmas – pagrindinių moralinių vertybių sąlygiškumas, kaip kartais naiviai bandoma tai įrodinėti.

Reliatyvumo teorija, kaip viena iš bendriausių ir keisčiausių fizikos teorijų, turėjo nemažos įtakos XX a. filosofijai ir kultūrai, kėlė neįprastas pažintines idėjas, formavo šiuolaikinį pasaulio suvokimą.

Fizika raidos pradžioje taip pat rėmėsi įprastine patirtimi ir tiesioginiu stebėjimų apibendrinimu. Tokiu būdu pasaulis buvo suskirstytas į kintantį Žemės ir nekintantį dangaus pasaulius, priimta, kad Saulė ir žvaigždės sukasi aplink Žemę, o ne priešingai, nes tai prieštarautų sveikam protui, padaryta išvada, kad kūno kritimo greitis yra proporcingas jį veikiančiai jėgai ir pan. Dėl savo akivaizdumo tie teiginiai ilgai vyravo moksle, bet, atlikus nuodugnius tyrimus, jų teko atsisakyti.

Fizikai tapus tiksliuoju mokslu, mokslininkai ėmė remtis tik matavimų rezultatais, matematiniu jų apibendrinimu, lygčių sprendiniais. Aišku, mokslininkas yra žmogus, tad jis neretai pasikliauja ir savo sveiku protu, ypač formuluodamas problemą ar kurdamas hipotezę, kai mokslo faktai yra negausūs ar netikslūs. Kartais tai padeda išvengti klystkelių, atmesti nepagrįstas hipotezes. Deja, fizikos istorija liudija, kad mokslininkai, kurie pernelyg pasikliaudavo sveiku protu, neretai atmes-

davo teisingas idėjas, kaip neįtikėtinas, ir pražiopsodavo atradimus, pavyzdžiui, V. Kruksas, pastebėjęs, kad katodinio vamzdelio aplinkoje genda fotoplokštelės, pareiškė protestą fotoplokštelių firmai, užuot įtaręs naujų spindulių egzistavimą; A. Lorencas, matematiškai nustatęs, kad kiekvienai atskaitos sistemai reikia įvesti savąjį laiką, palaikė tai matematiniu kuriozu ir t. t.

Kuo labiau fizika tolo nuo pojūčiais suvokiamos srities, tuo labiau jos rezultatai prieštaravo sveiko proto požiūriui. Juk pastarasis yra susiformavęs gana ribotos mūsų patirties pagrindu ir remiasi sąvokomis bei dėsningumais, kurie visai nepritaikomi tolimose srityse. Gamta nekartoja pati savęs – kiekvienoje srityje ji kitokia.

Šiuolaikinė fizika kai kuriems žmonėms atrodo keista, paradoksali ir net sunkiai suvokiama. Tačiau palaipsniui prie keistų mokslo rezultatų priprantama, naujoms kartoms jie jau nėra keisti ir tampa gana nesunkiai suvokiami. Šiandien mūsų jau nebestebina nei Žemės sukimasis apie Saulę, nei bandymai su elektra, nei Rentgeno spindulių skvarbumas. Nors priprasti prie keistų reliatyvumo teorijos išvadų ar elementariųjų dalelių savybių dar kol kas sunkoka, tačiau ir jos po pusės šimtmečio ar net dar greičiau nebekels jokios nuostabos.

Taigi **neskubėkime neigti ar atmesti mokslo tiesų vien todėl, kad jos prieštarauja įprastam požiūriui, – geriau pamėginkime jas suprasti**.

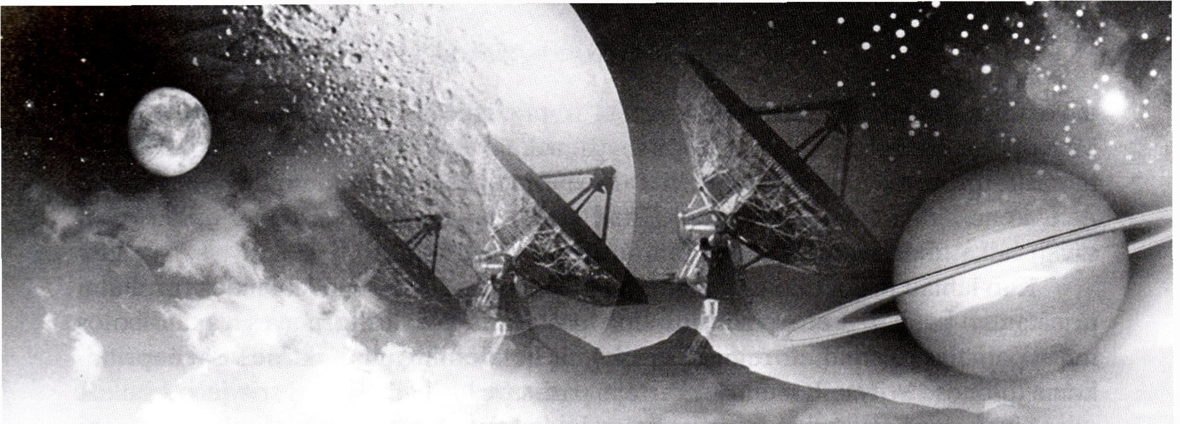
## Klausimai ir užduotys

**1. Ar laiko sulėtėjimas reiškia, kad laikas iš tikrųjų teka lėčiau, ar tik mums taip atrodo?**

**2. Ar judančio stebėtojo požiūriu sutrumpėja tik daiktai, ar ir atstumai erdvėje?**

**3. Paaiškinkite, kuo skiriasi kūno masė ir kūno rimties masė.**

**4. Kokį greitį turi įgyti raketa, kad jos masė padidėtų dvigubai?**



# OPTIKA

*Òptika*, arba mokslas apie šviesą, – tai seniausia (po mechanikos) fizikos dalis. Šviesa teikia žmogui svarbiausią informaciją apie mus supantį pasaulį. Ji yra kur kas sudėtingesnis reiškinys negu kūnų smūgiai ar judėjimas ir tikroji jos prigimtis paaiškėjo po ilgų tyrimų tik XIX a. pabaigoje. Senovės Graikijos mąstytojams labai trūko rimtų žinių apie šviesos reiškinius, todėl jie siūlė gana fantastiškas šviesos hipotezes, pvz., Demokritas manė, kad daiktai spinduliuoja savo atvaizdus, kurie pakliūva į akis ir leidžia žmogui suvokti nutolusius daiktus; Aristotelis papildė šią hipotezę miglota idėja apie skaidrios aplinkos tarpininkavimą; Platono pasekėjai neoplatonikai teigė, jog šviesa – tai tolimas psichinis veikimas (panašus į telepatiją). Labiausiai buvo paplitęs pitagorininkų mokymas, kad šviesa yra akių spinduliai, kurie atsispindi nuo daiktų ir grįžta atgal į akis, pranešdami apie sutiktus daiktus.

Remdamasis būtent šia teorija, geometrijos kūrėjas Euklidas suformulavo geometrinės optikos, nagrinėjančios spindulių sklidimą ir atspindį, pagrindus. Pirmasis, svarbiausias, jo „Optikos“ postulatas teigė: „Spinduliai, išeinantys iš akių, sklinda tiesiai ir nutolsta į begalybę“. Tai atitinka šiuolaikinį šviesos spindulių tiesiaeigio sklidimo dėsnį ir yra vienas iš pavyzdžių, kaip, naudojantis neteisingu modeliu, bet teisingais stebėjimų rezultatais, galima gauti teisingas išvadas. Šis modelis nesukliudė Euklidui, remiantis savo pirmtakų patirtimi, suformuluoti ir kitą bendrą dėsnį, jog šviesos spindulių atspindžio kampas lygus kritimo kampui. Euklidas nepateikė aiškinimo, kaip gali akių šviesa atsispindėti ir keisti kryptį, ir netgi čia panaudojo kitą terminą – „šviesos spindulys“, neapibrėždamas jo. Remdamasis tais dėsniais, Euklidas paaiškino šešėlių susidarymą, šviesos atspindį nuo plokščių, įgaubtų ir išgaubtų veidrodžių, regėjimo perspektyvą.

Po šių stulbinančių optikos atradimų sekė ilgas ir lėtas žinių kaupimo laikotarpis. Viduramžių mokslininkus labiausiai domino regėjimo ypatybės ir apgaulės. XIII a. buvo išrastas lęšis, – manoma, kad tai nagingo amatininko darbas. Tuo tarpu

mokslininkai scholastai įtariai žiūrėjo į tą apgaulingą stiklą, nes jis galįs ir didinti, ir mažinti, o kartais net nuspalvinti daiktus.

Antroji atradimų banga – XVII a., kai Snelas eksperimentiškai, o Dekartas teoriškai atrado spindulių lūžio dėsnį. Kepleris išsprendė mįslę – kodėl daiktų atvaizdai veidrodyje matomi ten, kur pačių daiktų nėra. Anot Keplerio, akis negali žinoti, kokiu keliu į ją pakliuvo spinduliai, nes ji mato daiktų atvaizdus ta kryptimi, iš kur atėjo spinduliai.

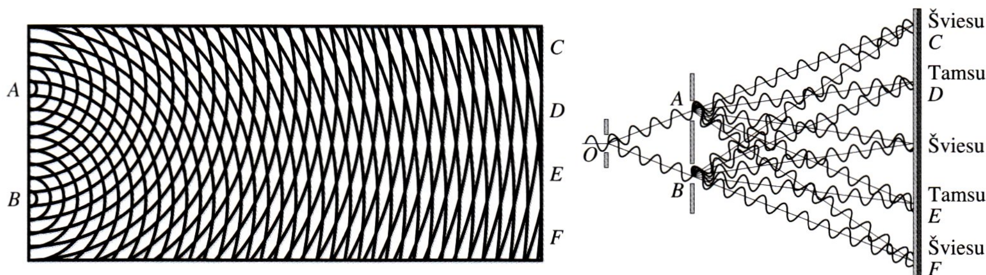
XVII a. buvo suformuluotos dvi jau ne filosofinės, o fizikinės teorijos apie šviesos prigimtį.

Anot vienos teorijos, kurią plėtojo F. Grimaldis (*Grimaldi*), R. Hukas, o nuosekliai suformulavo K. Hiuigensas savo veikale „Traktatas apie šviesą" (1690 m.), **šviesa yra erdvėje sklindančios bangos**. Remdamasis šia teorija, Hiuigensas paaiškino šviesos atspindį ir lūžį. Tačiau jo samprotavimai, kaip iš bangų susidaro tiesūs šviesos spinduliai, buvo dirbtiniai ir neįtikinantys. Be to, visos tuo metu žinomos bangos buvo perduodamos oro ar kitos medžiagos. Tad norint paaiškinti, kokiu būdu žemę pasiekia žvaigždžių šviesa, Hiuigensui teko prisiminti antikos filosofų įvestą, o vėliau Dekarto atgaivintą *èterį* – labai skaidrią ir retą (nes ji nestabdo dangaus kūnų judėjimo) *substáncija*, užpildančią visą erdvę. Retoje aplinkoje sklinda išilginės bangos, tad Hiuigensas, skirtingai negu Hukas, manė, kad šviesa yra išilginės, o ne skersinės bangos.

Tuo pat metu Niutonas suformulavo *korpuskulìnę šviesõs teòriją*, teigiančią, kad **šviesa yra mažyčių dalelių – korpùskulų – srautas**. Ji gerai paaiškino tiesiaeigį šviesos sklidimą, taip pat atspindį (korpuskula, kaip stangrus kamuoliukas, atšoka kampu, lygiu kritimo kampui). Tačiau, norint išvesti šviesos lūžio dėsnį, Niutonui teko padaryti prielaidą, kad medžiagos dalelės traukia šviesos korpuskulas (o to būti negali), todėl korpuskulinė teorija negalėjo atsakyti į klausimą, kodėl, susikirtus dviem šviesos spinduliams, jų korpuskulos neveikia vienos kitų (tai lengvai paaiškino banginė teorija, remdamasi bangų sanklotos principu). Antra vertus, šviesos dalelių judėjimui nereikėjo keistos jutimais nesuvokiamos medžiagos – eterio.

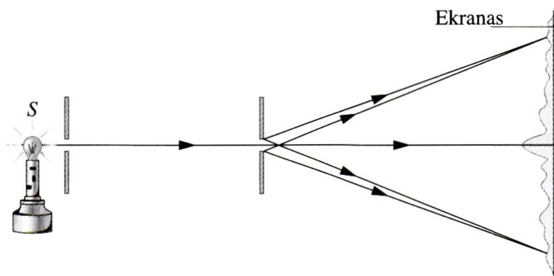
Pagrindinis Niutono argumentas prieš banginę šviesos teoriją buvo tas, kad šviesos spinduliai neužlinksta už kliūties – mes negalime matyti už kampo. Iš tikrųjų Grimaldis, eksperimentuodamas su siaurais šviesos spinduliais, kurių kelyje padėdavo mažyčius daiktus, buvo pastebėjęs jų šešėlio praplatėjimą ir spalvotų kraštelių susidarymą, bet nei jis, nei Hiuigensas nesuprato, kad šis reiškinys liudija banginės teorijos naudai. Vėliau Niutonas pats stebėjo šviesos užlinkimą už mažų kliūčių ar angų, bet paaiškino tai šviesos korpuskulų sąveika su medžiagos dalelėmis. Apskritai Niutonas kategoriškai nepasisakė prieš korpuskulinę teoriją, jis matė ir banginės teorijos pranašumus, aiškindamas kai kuriuos reiškinius, ir netgi bandė suderinti tas abi teorijas, iškeldamas idėją, kad šviesa sklinda kaip dalelės, bet, joms smogiant į kūną, atsiranda eterio bangos.

Taigi XVII a. pabaigoje ir net XVIII a. nei banginė, nei korpuskulinė šviesos teorijos nepateikė neginčijamų faktų, kurie užtikrintų vienos teorijos sėkmę, bet daugelis mokslininkų, sekdami Niutonu, šviesą traktavo kaip dalelių srautą.

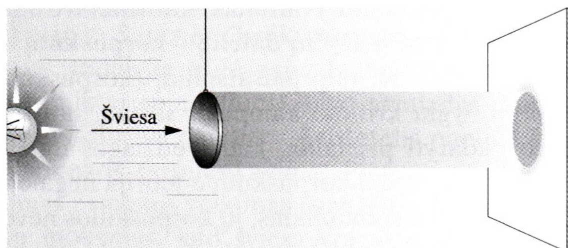



256 pav.

Kaip jau žinome, XVIII a. – mechanikos triumfo amžius. Per šį laikotarpį ji tarsi subrendo: tapo griežtu ir išsamiu mokslu. Tuo tarpu optika brendo lėtai. Tik XIX a. pradžioje prasidėjo naujas optikos atradimų etapas.




257 pav.




258 pav.

1802 m. Tomas Jungas (*Young*), įvairiapusių gabumų anglų mokslininkas (medikas, fizikas, matematikas, astronomas, egiptologas, zoologas), atliko paprastą, bet labai reikšmingą bandymą. Pradūręs kartono gabalėlyje smeigtuko smaigaliu dvi artimas skylutes ir apšvietęs jas pro plyšį langinėje saulės spinduliais, Jungas gavo du vienodus šviesos šaltinius *A* ir *B* (256 pav.). Būdamas banginės teorijos šalininkas, Jungas manė, kad šių šaltinių skleidžiamos bangos yra vienodos ir vienose vietose jos turėtų stiprinti vienos kitas, o kitose – silpninti. Tuo tikslu pastatęs bangų kelyje baltą ekraną, Jungas pamatė jame pakaitomis einančias tamsias (taškuose *C*, *D*, *E*, *F*) ir šviesias dėmeles. Šis margas raštas išnykdavo, uždengus vieną skylutę arba apšvietus skylutes išsklaidyta šviesa.

Iš tokio gauto interferencinio vaizdo Jungas sugebėjo gana tiksliai nustatyti šviesos bangos ilgį: raudonosios šviesos – 0,7 mikrometro, o violetinės šviesos – 0,42 mikrometro (dar XVII a. viduryje Niutonas buvo įrodęs, kad balta šviesa yra įvairių spalvų šviesos mišinys).

Jungo atradimus pratęsė kelių inžinierius Ogiustenas Frenelis (*Fresnel*). Jam pirmam pavyko suderinti banginę teoriją su tiesiaeigiu šviesos sklidimu. Nors praėjusios pro mažą skylutę šviesos bangos sklinda įvairiomis kryptimis, tačiau, užsiklojant bangoms nuo įvairių skylutės kraštų, ryškesnė atstojamoji banga susiformuoja tik skylutės ašies kryptimi (257 pav.), o tolstant į šonus, atstojamosios bangos

intensyvumas greitai mažėja ir po kelių svyravimų išnyksta. Vadinasi, šviesos bangoms praeinant pro mažą skylutę, matome tiesų šviesos spindulį.

Frenelio teorija paaiškino šviesos spindulio sklidimą pro mažytę angą ar kliūtį, t. y. šešėlių ir pusšešėlių susidarymą (258 pav.). Ši bandymo rezultatus patvirtinanti išvada pelnė Freneliui pripažinimą: jis laimėjo premiją ir buvo išrinktas akademiku.

Tokie ir panašūs šviesos interferencijos bei difrakcijos bandymai nulėmė banginės teorijos pergalę XIX a. fizikoje.

Išaiškinus, jog šviesos bangos yra skersinės ir sklinda tik kietuosiuose kūnuose, nuspręsta, kad jas perduodantis eteris turi pasižymėti labai keistomis savybėmis. Šviesos reiškiniai fizikams vėl tapo didžiule mįsle (fizikai juokaudavo, kad šviesa – pati tamsiausia dėmė fizikoje). Norint geriau pažinti šviesą, reikėjo sukurti elektromagnetinių bangų, reliatyvumo ir kvantinę teorijas.

# 17 SKYRIUS. FOTOMETRIJA

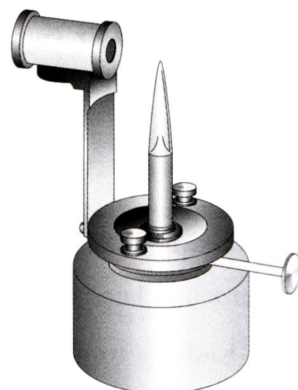
**Optikos skyrius, nagrinėjantis šviesos energinių dydžių matavimo metodus, vadinamas fotomètrija.**

Kiekvienos šviesos poveikis susijęs su jos pernešama energija, todėl šiame skyriuje bus nagrinėjami trys svarbiausieji fizikiniai dydžiai šviesos poveikiui įvertinti ir apibūdinti: *šviesõs stìpris* ($I$), *šviesõs sraũtas* ($\Phi$) ir *apšvietà* ($E$).

## 112. Šviesos šaltiniai – etalonai

XVIII a. pradėjus tobulinti optinius prietaisus ir juos gaminti, iškilo būtinybė kokybiškai apibūdinti šviesos šaltinius, atsirado nauja optikos sritis – *fotomètrija*. 1729 m. Pjeras Bugeras (*Bouguer*) paskelbė pirmąjį fotometrijos veikalą „Optiniai šviesos gradavimo bandymai“. Jame aprašomi šviesos šaltinių, lyginimo bandymai esant vienodai ekrano apšvietai.

Kad būtų galima palyginti šviesos šaltinių spinduliuojamų šviesos srautų stiprius, reikia turėti šviesos šaltinį – *etalòną*. Pirmuoju tokiu etalonu buvo laikoma tam tikro storio stearininė arba parafininė žvakė. Vėliau etaloninės žvakės buvo pakeistos etaloninėmis lemputėmis. Iš labiausiai vykusių etaloninių lempučių reikia laikyti *Hèfnerio lempùtę*. Tai amilacetatinė lemputė (259 pav.), kurios dagties storis 0,8 mm. Kai liepsnos aukštis yra 4 cm, tai jos spinduliuojamo šviesos srauto stipris laikomas lygiu vienai Hefnerio žvakei. Tačiau atviros liepsnos šviesos šaltinius nepatogu naudoti, todėl juos pakeitė pastovesni šviesos šaltiniai, kurių veikimas pagrįstas kieto kūno švytėjimu. Pirmasis toks etaloninės šviesos šaltinis buvo *speciãlios elèktros* (iš pradžių anglinio, vėliau volfra-



259 pav.

minio siūlelio) *lempùtės*. Jų spinduliuojamo šviesos srauto stipris buvo pavadintas *tarptautinė žvakė* (cd). Hefnerio žvakė buvo silpnesnė ir lygi 0,9 tarptautinės žvakės.

1948 m. įvestas naujas dabar tarptautinėje SI vienetų sistemoje naudojamas šviesos stiprio vienetas – *žvãkė* (cd). **1 cd stiprio šviesos srautą spinduliuoja grynos platinos stingimo (2046,6 K) temperatūroje absoliučiai juodo kūno 1/60 cm² ploto paviršius, kai šviesos stipris matuojamas statmena paviršiui kryptimi.** Žvakė yra kiek mažesnė už tarptautinę žvakę ir šiek tiek didesnė už Hefnerio žvakę. Šio šviesos stiprio vieneto srautas kiekvieną kartą gali būti tiksliai atkurtas. Tuo tikslu laboratorijose gaminamos absoliučiai juodo kūno ypatybėmis pasižyminčios krosnys su grynos platinos spinduliuotuvu.

## 113. Fotometriniai dydžiai ir jų matavimo vienetai

Šviesos šaltinis spinduliuoja į erdvę elektromagnetinių bangų energiją. Taigi šviesos spinduliavimo ir šviesos šaltinio galią galime išmatuoti fizikiniais metodais ir išreikšti tokiais energiniais vienetais: vatais, džauliais arba kalorijomis per sekundę. Antra vertus, šviesą mes jaučiame ir apie jos stiprį galime spręsti iš pojūčio stiprumo – šviesumo. Šviesos pojūčio negalime išmatuoti vien fizikiniais būdais bei išreikšti energiniais vienetais, nes jis priklauso ir nuo akies fiziologinių ypatumų (tinklainės sandaros, jautrumo ir kt.). Todėl *šviesos spindulių pluoštams apibūdinti naudojame enèrginius (objektyvius) ir šviesos pojūčio arba šviesinius (subjektyvius) dydžius bei vienetus.*

Pats paprasčiausias šviesos šaltinis yra *taškìnis šviesõs šaltìnis*. **Taškìnis šviesõs šaltìnis spinduliuoja šviesą visomis kryptimis vienodai, o jo matmenys yra daug kartų mažesni už atstumą iki apšviečiamų kūnų.** Juo yra žvaigždės, Saulė, tam tikromis sąlygomis gali būti ir elektros lemputė.

Nagrinėjant šviesos ypatumus, dažnai yra svarbu, kad iš šaltinio šviesos spinduliai sklistų lygiagrečiu pluoštu. Taip spindulius skleidžia prožektoriai, lazeriai. Iš Saulės sklindantys spinduliai irgi yra lygiagretūs, nes ji yra labai toli.

Šaltinio spinduliavimui įvertinti labai svarbu mokėti apibūdinti, kokio „storumo“ yra sklindantis šviesos srautas. Tuo tikslu įvedama *erdvìnio kam̃po* (Ω) sąvoka. **Erdviniu kampu vadinamas dydis, lygus rutulio paviršiaus ploto, kurį išpjauna kūgis, ir rutulio spindulio kvadrato santykiui**:

$$\Omega = \frac{S}{R^2}. \tag{263}$$

Santykis $\frac{S}{R^2}$ nepriklauso nuo rutulio spindulio, nes plotas $S$ proporcingas spindulio kvadratui.

Erdvinis kampas lygus vienetui, jeigu rutulio paviršiuje jis išpjauna plotą $S = R^2$. Šis erdvinio kampo vienetas vadinamas *steradianù* (sr), todėl $[\Omega] = \frac{S}{R^2} = \frac{R^2}{R^2} = 1$ sr.

Kadangi rutulio paviršiaus plotas $S_{max} = 4\pi R^2$, tai didžiausias erdvinis kampas, apimantis erdvę apie taškinį šviesos šaltinį, bus lygus $\Omega = \frac{S_{max}}{R^2} = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi$ (sr).

Šaltinio spinduliavimo intensyvumui apibūdinti įvedamas fizikinis dydis vadinamas *šviesõs stipriù* ir žymimas *I*. **Šviesõs stìpris apibūdina šaltinio spinduliavimo galią vieno steradiano erdviniame kampe.** Jo matavimo vienetas tarptautinėje SI vienetų sistemoje yra *kandelà* (lot. *candela* – žvakė), $[I]$ = cd. Kandelos etalonu yra labai tikslus specialios konstrukcijos šviesos šaltinis, tolygiai spinduliuojantis $\frac{1}{683}$ W šviesos energiją 1 sr kampu: $1\,\text{cd} = \frac{1}{683}\,\text{W/sr}$.

Apie 1 cd šviesos stiprio didumą galime spręsti iš to, kad paprastos degančios žvakės šviesos stipris lygus maždaug vienai kandelai.

Vienas svarbiausių dydžių, apibūdinančių šviesą, yra *šviesõs sraũtas*, žymimas raide Φ. Skirtingai nuo šviesos stiprio, apibūdinančio šviesos šaltinio išspinduliuojamą galią vieno steradiano erdviniu kampu, **šviesõs sraũtas parodo visų spindulių, sklindančių bet kokiu kampu, galią**.

**Šviesos srautas Φ – tai regėjimo pojūčiais įvertinama spindulių energija, kuri krinta į paviršių per vienetinį laiką ir lygi šviesos stiprio ir erdvinio kampo sandaugai:**

$$\Phi = I \cdot \Omega. \tag{264}$$

Šviesos srauto matavimo vienetas yra *liumènas* (lm): $[\Phi] = 1\,\text{cd} \cdot 1\,\text{sr} = 1\,\text{lm}$. **1 lm lygus šviesos srautui, kurį skleidžia 1 cd stiprio taškinis šaltinis į 1 sr erdvinį kampą.**

Kai šviesos šaltinis visomis kryptimis spinduliuoja vienodo stiprio šviesą, tai jo skleidžiamas srautas apskaičiuojamas pagal lygtį

$$\Phi_{max} = 4\pi I. \tag{265}$$

Žinome, kad $1\,\text{cd} = \frac{1\text{W}}{683\,\text{sr}}$, todėl liumeną galime išreikšti vatais:

$$1\,\text{lm} = \frac{1\text{W}}{683\,\text{sr}} 1\,\text{sr} = \frac{1}{683}\,\text{W} = 1{,}46 \cdot 10^{-3}\,\text{W}.$$

**Elektros lempos skleidžiamo šviesos srauto ir jos naudojamos elektros srovės galios santykis vadinamas lempos šviesõs našùmo koeficientù** (arba tiesiog *našumù*):

$$k = \frac{\Phi_{max}}{P} = \frac{4\pi I}{P}. \tag{266}$$

Kaitinamosios elektros lempos tik apie 2% elektros energijos paverčia šviesos energija.

Šviesa, kritusi į daiktus, nuo jų atsispindi ir, patekusi į akis, sukelia regėjimo pojūtį, todėl mes matome daiktus. Logiška manyti, kad daiktai yra įžiūrimi tik tada, kai jie pakankamai apšviesti.

**Fizikinis dydis, lygus šviesos srauto, krintančio į paviršiaus plotą, santykiui su to ploto didumu, vadinamas apšvieta:**

$$E = \frac{\Phi}{S}; \tag{267}$$

čia $E$ – apšvieta, Φ – šviesos srautas, $S$ – paviršiaus plotas. Iš šios formulės matyti, kad apšvietos matavimo vienetas yra liùksas (lot. *lux* – šviesa): $[E] = \frac{1\,\text{lm}}{1\,\text{m}^2} = 1\,\text{lx}$.

**1 lx dydžio apšvietą sukuria 1 lm šviesos srautas, krintantis į 1 m² ploto paviršių.**

Esant gerai apšvietai, nevargsta akys ir galima aiškiai regėti daiktus bei kontūrus. 260 paveiksle grafiko kreivė parodo, kaip geras regėjimas ($R$) priklauso nuo apšvietos. Aiškiai matome tik tada, kai 0,2′ kampu nutolusius taškus galime regėti atskirai vieną nuo kito. Darbo vietos apšvieta, dirbant su stambiais daiktais, turi būti ne mažesnė negu 10 lx, skaitant bei rašant – 25 lx ir piešiant bei dirbant su smulkiais daiktais – 50 lx. Dienos šviesa siekia iki 3000 lx.



260 pav.

Kai šviesos šaltinis yra taškinis, visas jo srautas lygus $\Phi_{max} = 4\pi I$ ir tolygiai pasiskirsto jį supančios sferos, kurios plotas $S_{max} = 4\pi R^2$ (261 pav.), paviršiuje. Taškinio šaltinio apšvieta apskaičiuojama taip:

$$E = \frac{\Phi_{max}}{S_{max}} = \frac{4\pi I}{4\pi R^2} = \frac{I}{R^2}. \qquad (268)$$

**Apšvieta statmenais spinduliais yra tiesiogiai proporcinga šaltinio šviesos stipriui ir atvirkščiai proporcinga atstumo iki šviesos šaltinio kvadratui**. Tai yra pirmasis apšvietos dėsnis.

Plokščio paviršiaus, pavyzdžiui, stalo apšvietą (remiantis šia formule) galime apskaičiuoti tik viename taške (arba labai mažame plote) – ten, kur spinduliai krinta statmenai stalo paviršiui (261 pav., taškas $A$).

Apšvietos priklausomybei nuo spindulių kritimo kampo įrodyti geriausia nagrinėti paviršius, apšviečiamus lygiagrečių spindulių pluoštu. Tokiu atveju apšviestumas teoriškai nepriklauso nuo atstumo iki apšviečiamo ploto, nes šviesos srautas nesisklaido. Tačiau jis priklauso nuo to, kokiu kampu spinduliai krinta į apšviečiamą paviršių.

Kaip jau žinote, spindulio kritimo kampu vadinamas kampas tarp krintančiojo spindulio $R_1$ (261 pav.) ir statmens apšviečiamam paviršiui. Kai krinta lygiagretūs spinduliai, patogiau yra matuoti kritimo kampui lygų kampą tarp apšviečiamos plokštumos $S'$ ir statmenos spinduliams plokštumos $S$ (262 pav.)



261 pav.



262 pav.

Palyginkime stačiakampės plokštelės apšvietą, kai ji statmena spinduliams ir pasvirusi kampu $\alpha$ (262 pav.). Sakykime, plokštelės paviršius $S$, o ilgis $AB$.

Iš 267 formulės išplaukia, kad statmeno paviršiaus apšvieta lygi $E_0 = \frac{\Phi_0}{S}$, o pakreipus plokštelę kampu $\alpha$, į ją kris mažesnis šviesos srautas $\Phi$ ir paviršiaus apšvieta bus $E = \frac{\Phi}{S}$. Matematiškai pertvarkę šias lygtis, gauname, kad apšvietų santykis lygus $\frac{E}{E_0} = \frac{\Phi}{\Phi_0}$, arba $E = E_0 \frac{\Phi}{\Phi_0}$.

Iš 262 paveikslo matome, kad šviesos srautų santykis lygus atkarpų $AC$ ir $AB$ santykiui $\left(\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{AC}{AB}\right)$, o pastarasis lygus plokštelės pasvirimo kampo kosinusui (žr. statųjį trikampį $ACB'$).

Taigi $\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{AC}{AB'} = \cos\alpha$. Vadinasi,

$$E = E_0 \cos\alpha. \tag{269}$$

**Paviršiaus apšvieta yra tiesiogiai proporcinga spindulių kritimo kampo kosinusui**. Tai — antrasis apšvietos dėsnis.

Pavyzdžiui, spinduliams krintant į paviršių 60° kampu, apšvieta būna perpus mažesnė negu jiems krintant statmenai $\left(\cos 60^\circ = \frac{1}{2}\right)$. Tai reiškia, kad paviršiui tenkantis šviesos energijos kiekis sumažėja du kartus.

Žemei sukantis apie Saulę, nuo pavasario ir rudens *lygiãdienių* (kovo 21 ir rugsėjo 23 d.) iki vasaros ir žiemos *saulégrįžų* (birželio 22 ir gruodžio 22 d.) Saulės spindulių kritimo į Žemę kampas pasikeičia – sumažėja ar padidėja – tik 23°27′, tačiau mes jaučiame pakankamai didelį šviesos ir šilumos pasikeitimą.

Dažnai tenka apskaičiuoti apšvietą, kai taškinio šviesos šaltinio spinduliai į paviršių krinta tam tikru kampu (261 pav., taškas $B$). Tam į antrojo apšvietos dėsnio formulę (269) įrašome pirmojo apšvietos dėsnio $E_0$ išraišką (268) ir gauname jungtinę apšvietos formulę

$$E = \frac{I}{R_1^2} \cos\alpha. \tag{270}$$

Iš 261 paveikslo matyti, kad kampo kosinusą galima išreikšti ir taip: $\cos\alpha = \frac{h}{R_1}$. Tada 270 lygtis bus tokia:

$$E = \frac{Ih}{R_1^3}. \tag{271}$$

**Jeigu paviršių apšviečia keletas šaltinių, tai atstojamoji apšvieta lygi atskirų šaltinių apšvietų toje vietoje sumai.**

Kokia turi būti normali, t. y. pakankama ir akių nevarginanti apšvieta skaitykloje, siuvimo ceche, tekintojo darbo vietoje, valgykloje, sporto salėje ir kitur,

sprendžia medikai, ekonomistai, gamybininkai. Tai opi šiuolaikinė problema, turinti didelę įtaką darbo našumui ir žmonių sveikatai. Todėl visoms žmogaus veiklos rūšims nustatomos higieninės apšvietos normos. Kai kurios gyvenamųjų ir visuomeninių patalpų apšvietos normos pateiktos 13 lentelėje. (*Pastaba*: patalpos apšvieta matuojama 0,8 m aukštyje nuo grindų.)

Paviršiaus apšvieta matuojama specialiu prietaisu, vadinamu *liuksmetrù*. Jautrioji jo dalis yra fotoelementas – puslaidininkinis prietaisas, šviesos energiją paverčiantis elektros energija. Elektros srovė nukreipia galvanometro rodyklę proporcingai fotoelemento apšvietai.

Tokiu pačiu principu veikia ir *fotoeksponomètras* – prietaisas espozicijos trukmei nustatyti fotografijoje priklausomai nuo fotografuojamo objekto apšvietos.

## Klausimai ir užduotys

**1. Kodėl dieną iš lauko sunku matyti pro lango stiklą kambario vidų, neprikišus veido prie pat stiklo?**

**2. Dažnai saulės atokaitoje tirpsta sniegas ant nuolaidžių stogų, bet netirpsta ant žemės. Kodėl?**

**3. Ant 6 cm aukščio strypo kabo 400 cd šviesos stiprio lempa. Apskaičiuokite žemės paviršiaus apšvietą 8 m atstumu nuo stulpo pagrindo.**

**4. Koks šviesos srautas krinta į 10 cm$^2$ ploto paviršių, esantį už 2 m nuo 200 cd stiprio taškinio šviesos šaltinio? Spinduliai krinta į tą paviršių statmenai.**

**5. Ekraną apšviečia dvi vienodos elektros lempos, stovinčios greta 1 m atstumu nuo ekrano. Kiek reikės priartinti ekraną, kad liktų tokia pati apšvieta, vieną lempą užgesinus?**

**6. Degančios elektros lempos siūlas ilgainiui plonėja, o jo varža didėja. Ar tai turi įtakos lempos šviesos srautui ir šviesos stipriui?**

**7. Taškinis šviesos šaltinis, esantis 0,5 sr erdvinio kampo viršūnėje, skleidžia 250 lm šviesos srautą. Apskaičiuokite to šaltinio šviesos stiprį.**

**8. Kokį šviesos srautą spinduliuoja taškinis 30 cd stiprio šviesos šaltinis 0,62 sr erdviniu kampu?**

**9. Kokiu atstumu nuo taškinio 160 cd stiprio šviesos šaltinio yra 460 cm$^2$ ploto paviršius, į kurį statmenai krinta 0,024 lm šviesos srautas?**

**10. Kai elektros lemputė vartoja 100 W galią, jos šviesos stipris lygus 100 cd, o kai nevisiškai įkaitusi – tik 80 W galią, jos šviesos stipris lygus 65 cd. Apskaičiuokite šiais režimais veikiančios lemputės šviesos našumą (šviesos srautą, tenkantį vienam vatui).**

**11. Virš plokštumos, sudarančios su horizontu 20° kampą, 2 m aukštyje kabo 100 cd stiprio lempa. Kokia yra tos plokštumos apšvieta?**

13 lentelė

**Įvairių darbo vietų rekomenduojama apšvieta**

| Patalpa | Apšvieta *E* (lx) | |
|---|---|---|
| | Kaitinamosiomis lempomis | Dienos šviesos lempomis |
| Mokymo kabinetas | 150 | 300 |
| Klasės lenta | 150 | 300 |
| Braižybos kabinetas | 200 | 400 |
| Siuvimo kabinetas | 200 | 400 |
| Sporto salė | 100 | 200 |
| Aktų salė | 100 | 200 |
| Skaitykla | 150 | 300 |
| Valgykla, bufetas | 75 | 200 |
| Rūbinė | 50 | 100 |
| Laiptinė ir koridorius | 10 | 30 |
| Šaltkalvystės dirbtuvė | 150 | 300 |
| Mokytojų kambarys | 100 | 200 |
| Gyvenamasis kambarys bendrabutyje | 50 | 100 |
| Virtuvė | 30 | 100 |
| Ligoninės palata | 30 | 75 |
| Operacinė (operacinio stalo paviršius) | 3000 | – |

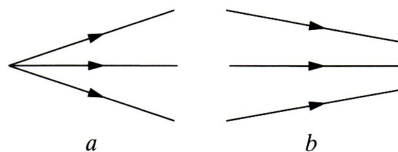
# 18 SKYRIUS. GEOMETRINĖ OPTIKA

**Optikos šaka, kurioje reiškiniai nagrinėjami taikant šviesos spindulio sąvoką, vadinama geomètrine optika.**

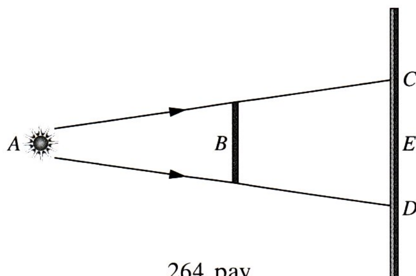
Taikant geometrinės optikos metodus, galima sužinoti, kaip veikia įvairūs optiniai prietaisai: nuo paprasčiausių akinių iki milžiniškų teleskopų, kuriais tiriamos Visatos gelmės; išsiaiškinti, kaip susidaro vaivorykštė, kas yra miražas, kodėl žėri brangakmeniai ir daugelį kitų klausimų.

## 114. Šviesos spindulių sklidimas erdvėje

Šviesos šaltinių išspinduliuota šviesa nušviečia aplinkinius kūnus ir pasiekia mūsų akis. Sklindančios erdvėje šviesos nematome ir ją pastebime tik tada, kai ji, kritusi į aplinkinius kūnus, apšviečia juos. Taigi mes matome tik sklindančios erdvėje šviesos kelio galą, kai kūnas ją atspindi arba išbarsto. Jei šviesos sklidimo kelyje paskleisime labai daug šviesą išbarstančių smulkių dalelių, pvz., ore esančių dulkelių arba dūmų, tai matysime galinius šviesos kelio taškus, kurių seka sudarys sklindančios šviesos kelią. Kai pro siaurą angelę šviesa sklinda į tamsų kambarį, tai dulkėtame ore matomas šviesos kelias. Kuo siauresnė angelė, pro kurią praeina šviesa, tuo plonesnį šviesos pluoštelį matome.




263 pav.




264 pav.

Geometrinėje optikoje kalbame apie *šviesõs spiñdulį* – be galo ploną šviesos pluoštelį. Šviesos spindulį vaizduojame plona tiese ir suprantame kaip šviesos energijos sklidimo kryptį.

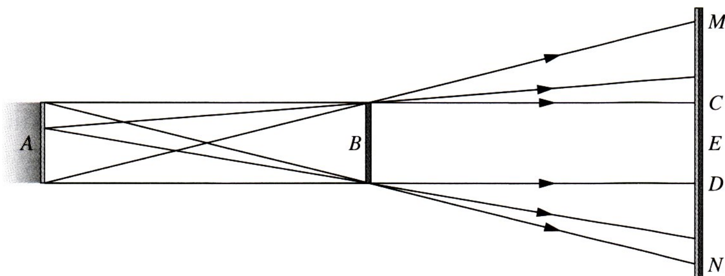
Iš taškinio šviesos šaltinio į visas puses sklinda šviesos spinduliai. Sklindantys į erdvinį kampą šviesos spinduliai sudaro spindulių pluoštą (263 pav., *a* ir *b*). Išeinantys iš taško šviesos spinduliai sudaro *skleistìnį* (*divergúojantįjį*) (*a*), o sueinantys į tašką – *sueitìnį* (*konvergúojantįjį*) *spindulių̃ plúoštą* (*b*).

**Vienalytėje aplinkoje nesutrikdytas šviesos spindulys sklinda tiese.** Tai rodo neskaidrių objektų šešėlių susidarymas. 264 paveiksle parodyta: *A* – taškinis šviesos šaltinis, *B* – neskaidrus kūnas, *E* – ekranas.

Sklindant šviesos spinduliams tiesiomis linijomis, į ekraną tarp taškų *C* ir *D* nepaklius joks šviesos spindulys. Vadinasi, gausime griežtų kraštų šešėlį. Tačiau taškinio šviesos šaltinio nėra, visada naudojamės baigtinio ploto šviesos šaltiniais, kurie susideda iš daugelio taškinių šaltinių. Tokiais šaltiniais apšvietus neskaidrų kūną, susidarys, kaip rodo 265 paveikslas, pusšešėlio sritys *MC* ir *ND*, į kurias paklius dalis šviesos spindulių (tik vieno šaltinio). Šiuo atveju turėsime tolydžiai stiprėjančią apšvietą, pereinančią iš šešėlio per pusšešėlį į šviesos sritį. Pusšešėlio plotis priklauso nuo šviesos šaltinio šviečiančio ploto ir nuo daikto nuotolių tarp šaltinio ir ekrano santykio. Kai daikto plotas yra mažas, palyginti su šaltinio plotu, susidaro tik pusšešėlis, o šešėlis visai išnyksta.

**Šešėlio ir pusšešėlio susidarymas galimas todėl, kad šviesa vienalytėje aplinkoje sklinda tiesiomis linijomis.**

Kaip šviesos spinduliai sklinda erdvėje, geometrinėje optikoje nusako *šviesos spindulių apgręžiamùmo dėsnis*. Jis tvirtina: **jei nusklidusio tam tikromis sąlygomis šviesos spindulio kelias yra žinomas ir kitas spindulys sklinda kad ir labai trum-**



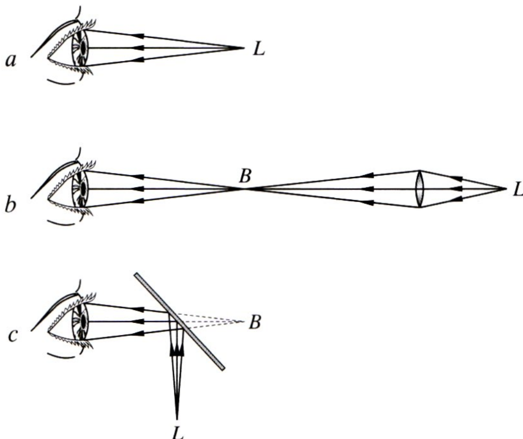

265 pav.

**poje kelio dalyje lygiai taip pat, tik atvirkščia kryptimi, tai pastarasis ir visą likusią kelio dalį nusklis pirmojo spindulio keliu, tik priešinga kryptimi.**

Taigi **kiekvieną spindulį galime apgręžti**. Šis dėsnis griežtai tinka tik geometrinės optikos sąlygomis, kai šviesos bangos ilgis yra labai mažas, palyginti su apšviečiamų daiktų dydžiais.

Šviesos srautą galime suskaidyti į atskirus šviesos pluoštus. *Atskirų išskirtų šviesos pluoštų poveikis visai nepriklauso nuo to, ar kiti pluoštai veikia kartu, ar jie yra pašalinti*, pvz., jei į fotoaparato objektyvą krinta platus vaizdo spindulių pluoštas, tai, dalį spindulių sulaikę diafragmuodami objektyvą, susidariusio fotoplokštelėje atvaizdo nepakeičiame. Šią šviesos spindulių pluoštelių ypatybę vadiname jų *nepriklausomumù*.

Kai švytinčio taško $L$ (266 pav., *a*) išspinduliuoti spinduliai, nekeisdami savo krypties, patenka į mūsų akis, šį tašką matome tiesiogiai. Šiuo atveju švytintis taškas yra skleistinių spindulių kūgio, kurio pagrindas yra akių vyzdis, viršūnėje. Kūgio viršūnė yra šviesos spindulių išeities taškas. Tokį spindulių pluoštą vadiname *homocentriniù* (bendro centro). Kai sklindantieji iš atskirų daikto paviršiaus taškų skleistiniai spindulių pluoštai krinta į akis, mes matome šiuos daiktus.



266 pav.

Kartais (266 pav., *b* ir *c*) mes matome daiktą ne ten, iš kur spinduliai iš tikrųjų sklinda (taškas $L$), bet ten, iš kur jie tariamai išeina (taškas $B$). Tada sakome, kad regime *dáikto L átvaizdą B*. Išlaikant spindulių homocentriškumą, kiekvienas daikto taškas bus atvaizduotas taip pat tašku. Tokį daikto atvaizdą vadiname *stigmátiniu*. Spindulių apgręžiamumas leidžia atvaizdą laikyti daiktu, o daiktą – atvaizdu. Todėl, turėdami stigmatinį atvaizdą, spindulių pluoštų centrus (taškinį daiktą ir atvaizdą) vadiname *òptinės sistèmos jungtìniais taškaĩs*.

Sklindančių iš atskirų daikto taškų skleistinių spindulių kryptį optiniu prietaisu (lęšiu, prizme) galime taip pakeisti, kad jie vėl sueitų į vieną tašką ir toliau vėl sklistų skleistiniu pluoštu, kaip ir iš atskirų daikto taškų. Tada gausime taško (objekto) *tìkrąjį*, arba realųjį, *ãtvaizdą* (266 pav., *b*). Tačiau kartais į akis krinta skleistinių spindulių pluoštas ir spindulių tęsiniai susikerta nebe išeities taške (266 pav., *c*). Toks **tariamas spindulių susikirtimas vadinamas daikto taško *menamúoju ãtvaizdu*. Jis susidaro tokiame taške, iš kurio spinduliai iš tikrųjų nesklinda**. Kai daikto atskirų taškų atvaizdai sugula erdvėje vienas šalia kito tokia pat tvarka, kaip ir daikte, gauname tikrą arba menamą daikto atvaizdą.

Atvaizdai gali būti *tiesíeji*, kai jų padėtis tokia pat kaip ir objektų, arba *apverstíeji*, kai jie pasukti tam tikru (dažniausiai 180°) kampu. Atvaizdai būna didesni arba mažesni už patį daiktą, tuomet turime padidintus ar sumažintus daikto atvaizdus.

## Klausimai ir užduotys

**1. Kaip galima garantuoti statomo televizijos bokšto vertikalumą? Kaip išlaikyti reikiamą kryptį statant po žeme metro tunelius? Atsakymą pagrįskite brėžiniu.**

**2. Iš kokių požymių galima nustatyti, kad esate kurio nors daikto pusšešėlyje?**

**3. Kodėl gatvės žibinto šviesoje kojų šešėlių kontūrai yra ryškūs, o galvos šešėlio – neaiškūs?**

**4. Šviesos šaltinio skersmuo 20 cm, o nuotolis iki ekrano 2 m. Kokiu mažiausiu atstumu nuo ekrano reikia padėti 8 cm skersmens kamuoliuką, kad jis į ekraną mestų ne šešėlį, o tik pusšešėlį? (Tiesė, einanti per šviesos šaltinio ir kamuoliuko centrus, yra statmena ekranui.)**

**5. Saulės apšviesto krano šešėlis yra 75 m ilgio, o vertikalios 2 m ilgio gairės – 3 m ilgio. Apskaičiuokite krano aukštį.**

**6. Ant stalo vertikaliai pastatytas 15 cm ilgio pieštukas meta 10 cm ilgio šešėlį. Kokiame aukštyje virš stalo kabo lempa? Nuo pieštuko pagrindo iki statmens, nuleisto iš lempos centro į stalo paviršių, pagrindo yra 90 cm. Kaip išmatuoti bet kokios lempos aukštį virš grindų?**

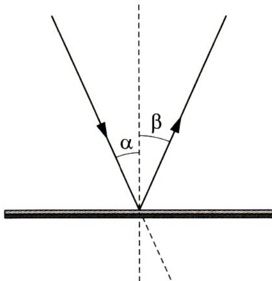
## 115. Šviesos atspindys. Atspindžio dėsniai

Pereidama dvi optiniu atžvilgiu nevienodas aplinkas skiriantį paviršių, šviesa iš dalies atsispindi ir iš dalies pereina į kitą aplinką. Priklausomai nuo skiriamojo paviršiaus ypatybių šviesa gali atsispindėti visiškai arba iš dalies. Kai paviršius, nuo kurio atsispindi šviesa, yra lygus, turime *veidrodìnį šviesõs ãtspindį*. Taip atsispindi šviesa nuo veidrodžių (stiklinių arba metalinių), nuo gyvsidabrio, vandens paviršiaus. Bet kai šviesą atspindintis paviršius yra nelygus, turime *sklaĩdųjį (difùzinį) šviesõs ãtspindį*.

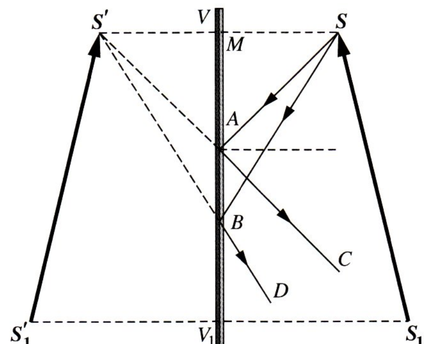
Remiantis 267 paveikslu, formuluojami šviesos atspindžio dėsniai:

**1) krintantysis ir atsispindėjęs spindulys bei statmuo, iškeltas iš kritimo taško, yra vienoje (kritimo) plokštumoje;**

**2) kritimo kampas $\alpha$ ir atspindžio kampas $\beta$ yra lygūs ($\alpha = \beta$).**



267 pav.



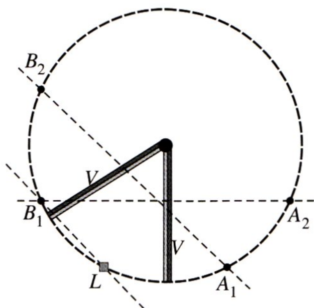
268 pav.

**Veidrodiškai šviesa atsispindi nuo plokščių bei kitos formos veidrodinių paviršių.** Iš pradžių suraskime švytinčio taško $S$ arba daikto $SS_1$ atvaizdą plokščiajame veidrodyje $VV_1$ (268 pav.). Kritę iš taško $S$ į veidrodį spinduliai $SA$ ir $SB$ nuo jo atsispindi ir nusklinda išsisklaidydami kryptimi $AC$ ir $BD$. Jų tęsiniai susikerta ir atrodo tartum abu spinduliai būtų išėję iš taško S′. Iš 267 paveikslo matome, kad $\Delta\, SAB = \Delta\, S'AB$, nes jų kraštinė $AB$ yra bendra, o kampai prie $AB$ yra atitinkamai lygūs. Tada $\angle\, ASM = \angle\, MS'A$. Vadinasi, $S'S \perp VV_1$ ir $S'M = MS$. Taigi taško $S$ atvaizdas yra statmenoje veidrodžio plokštumai tiesėje, išvestoje iš $S$, ir nutolęs nuo veidrodžio tiek, kiek yra nutolęs ir švytintis taškas $S$. Panašiai surandame ir kito kraštinio daikto taško $S_1$ atvaizdą $S'_1$. Visų tarpinių tarp $S$ ir $S_1$ daikto taškų atvaizdai suguls atitinkamai tarp $S'$ ir $S'_1$ ir sudarys daikto atvaizdą $S'S'_1$, kuris yra menamas, tiesus, tokio pat dydžio ir veidrodiškai simetriškas: daikto dešiniosios pusės atvaizdas yra kairioji atvaizdo pusė, o kairiosios – dešinioji, nes daikto atvaizdas yra pasuktas 180°.

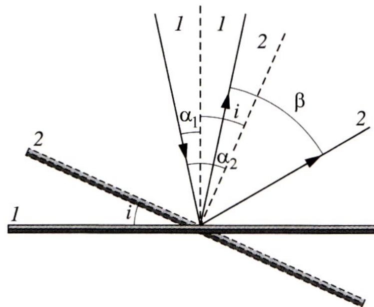
Sustatę du plokščiuosius veidrodžius $V$ bet kuriuo kampu, gausime *kampinį veidrodį* (269 pav.). Tinkamai stebėdami, matysime be galo daug daikto $L$ atvaizdų $A_1, A_2, B_1, B_2, ...$ abiejuose veidrodžiuose, nes, tik kelis kartus atsispindėję nuo vieno ir kito veidrodžio, spinduliai pateks į stebėtojo akis. Atvaizdų geometrinis išsidėstymas abiejuose veidrodžiuose rodo, kad visi jie, taip pat ir daiktas guli apskritime, išvestame taip, kad apskritimo centras būtų kampinio veidrodžio viršūnė.

Kampiniame veidrodyje gauname kur kas paprastesnį atspindžio reiškinį, jeigu kampas tarp abiejų veidrodžių sudaro sveikąją 2π kampo dalį, nes tais atvejais kai kurie atvaizdai sutampa. Pavyzdžiui, stačiakampiame kampiniame veidrodyje matome tik tris objekto atvaizdus, iš kurių vienas yra tiesioginis, o ne veidrodiškai simetrinis daikto atvaizdas.

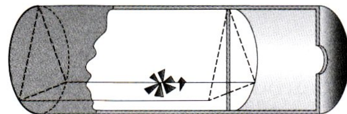
Plokštieji veidrodžiai labai plačiai naudojami įvairiuose prietaisuose šviesos spinduliams nukreipti reikalinga kryptimi arba surasti nedideliems aparatų judamųjų dalių pasisukimo kampams. Kai spindulių pluoštelis krinta į plokščiąjį veidrodį kampu $\alpha$, tai atsispindėjęs jis nusklinda kryptimi, kuri sudaro su pirmine jo sklidimo kryptimi kampą, lygų $(180° - 2\alpha)$ (267 pav.). Pasisukus veidrodžiui kampu $i$ (270 pav.), atsispindėjusio nuo jo spindulio kryptis pakinta: $\beta = 2i$, nes $i = \alpha_2 - \alpha_1$, o $\beta = 2\alpha_2 - 2\alpha_1$.



269 pav.



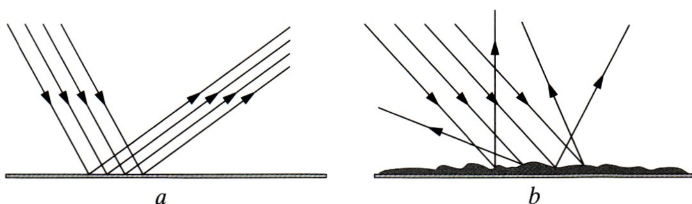
270 pav.


271 pav.

Atspindžio kampiniame veidrodyje savybės pritaikytos *kaleidoskopè*. Jį sudaro veidrodinė prizmė, į kurios vidų įberiama įvairiaspalvių stiklo gabaliukų (271 pav.). Dėl daugkartinio netaisyklingai pabirusių stikliukų atspindžio jų atvaizdas sudaro gražią taisyklingą figūrą, kuri visą laiką keičiasi sukant veidrodinę prizmę.

Nagrinėjome pavyzdžius, kuriuose naudojamas veidrodis. Fizikoje **veidrodžiu vadinamas bet koks lygus paviršius, gerai atspindintis šviesą.** Geriausi veidrodžiai yra gyvsidabrio ir idealiai nušlifuoto sidabro paviršius. Lygiagretūs spinduliai, atsispindėję nuo plokščiojo veidrodžio, išlieka lygiagretūs, tik sklinda kita kryptimi (272 pav., *a*). Toks atspindys vadinamas *veidrodiniù*. **Veidrodinis atspindys gaunamas, kai atspindinčio paviršiaus nelygumai yra mažesni už šviesos bangos ilgį.**

*Kai atspindinčių šviesą kūnų paviršius nėra lygus, gauname sklaĩdųjį, arba difùzinį, šviesõs ãtspindį.* Nuo tokio paviršiaus atsispindėjusi šviesa sklinda visomis kryptimis. Nelygų paviršių galime laikyti sudėtą iš daugelio plokščių, skirtingai nukreiptų mažų veidrodėlių. Nuo kiekvieno tokio paviršiaus taško šviesa atsispindi taisyklingai. Kadangi į tuos veidrodėlius ji krinta skirtingais kampais, tai nuo jų atsispindėjusi sklinda skirtingomis kryptimis (272 pav., *b*).



272 pav.

**Kūnai, kurie šviesos spindulius išsklaido, yra gerai matomi iš visų pusių, o atspindintys šviesą kūnai tampa nematomais.** Juose matome tik aplinkinių kūnų atvaizdus, pavyzdžiui, jeigu klasės lenta blizga, sunku įžiūrėti, kas ant jos rašoma.

Kūnai ne tik atspindi šviesą, bet dalį jos ir sugeria. Kadangi atspindimos ne visos, o tik tam paviršiui būdingo dažnio bangos, todėl pasaulį matome spalvotą. Tai aiškinsime tolesniuose skyriuose.

## Klausimai ir užduotys

**1. Kodėl dieną namų langai atrodo tamsūs?**

**2. Kokį pakrantės medžių atvaizdą matome ežero vandenyje – tiesų ar apverstą? Kodėl?**

**3. Paaiškinkite, kodėl paprastas stiklas yra skaidrus, o grūstas – neskaidrus, baltos spalvos.**

**4. Kodėl skaidrių vandens lašelių debesys yra neskaidrūs?**

**5. Kodėl automobiliuose priešais vairuotoją įtvirtinami veidrodžiai? Kaip jie išdėstomi? Kodėl?**

**6. Švytintis taškas artėja prie plokščiojo veidrodžio greičiu $v_0$. Kokiu greičiu judės to taško atvaizdas, jeigu stebėsime atskaitos sistemoje, susijusioje su: a) švytinčiu tašku; b) veidrodžiu?**

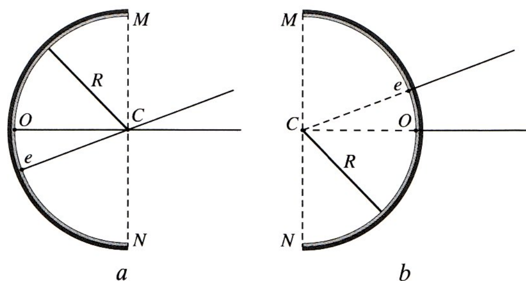
**7. Žmogus stovi už 5 m nuo plokščiojo veidrodžio. Kokiu atstumu nuo savęs jis mato savo atvaizdą? Koks yra tas atvaizdas? Kaip pasikeis šis atstumas, veidrodį pastūmus nuo žmogaus dar 2 metrus? Kodėl?**

**8. Saulės spindulys, perėjęs pro užuolaidos skylę, sudaro su stalo paviršiumi 48° kampą. Kaip reikia padėti plokščiąjį veidrodį, norint nukreipti spindulį horizontaliai?**

**9. Keliu einantis žmogus pamatė priekiniame automobilio stikle Saulės atvaizdą. Kokiu kampu į horizontą buvo pakrypęs stiklas, jeigu Saulės aukštis virš horizonto buvo lygus 18°, o į žmogaus akis pateko horizontaliai nuo stiklo sklindantys spinduliai?**

## 116. Rutuliškieji ir paraboliškieji veidrodžiai

Be plokščiųjų veidrodžių, technikoje ir buityje daug kur naudojami veidrodžiai kreivais paviršiais. *Veidrodžiai, kurių paviršius yra rutulio dalis, vadinami rutuliškaĩsiais arba sferiškaĩsiais.* Rutuliškieji veidrodžiai gali būti įgaubtieji (273 pav., *a*) ir iškilieji (273 pav., *b*). Veidrodį ribojančio apskritimo skersmuo *MN* vadinamas jo *angà*, o labiausiai nutolęs nuo angos veidrodžio paviršiaus taškas *O* vadinamas jo *viršū́ne*. Statmuo veidrodžiui, einantis per jo kreivumo centrą *C* ir viršūnę *O*, vadinamas *pagrindinè òptine ašimì*, o bet kuri kita tiesė, einanti per tašką *C* ir kurį nors veidrodžio paviršiaus tašką *e*, – *šalutinè òptine ašimì*.

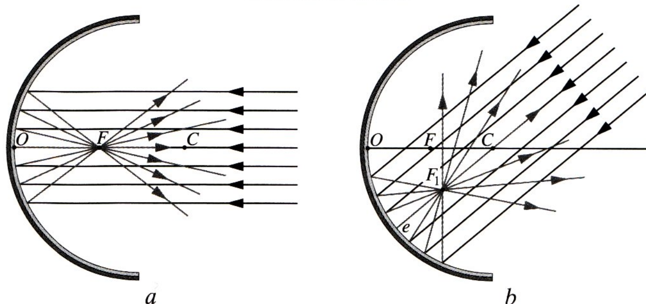


273 pav.

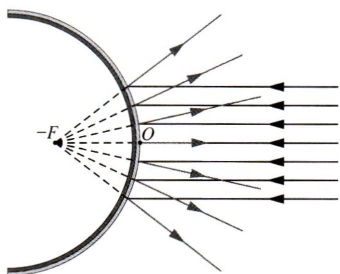
Rutuliškiesiems veidrodžiams galioja šviesos atspindžio dėsniai.

Jeigu į įgaubtą veidrodį nukreipsime pluoštą su pagrindine optine ašimi lygiagrečių spindulių, tai visi jame atsispindėję spinduliai eis per pagrindinės optinės ašies tašką *F*, vadinamą *pagrindiniù véidrodžio žìdiniu* (274 pav., *a*). Atstumas *OF* vadinamas *pagrindìnio žìdinio núotoliu*. Nesunkiai įrodoma, kad pagrindinio židinio nuotolis lygus pusei veidrodžio kreivumo spindulio:

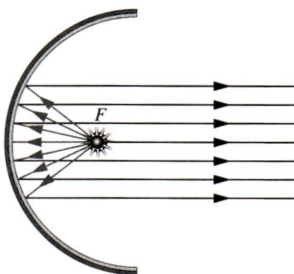
$$F = OF = \frac{R}{2}. \qquad (272)$$



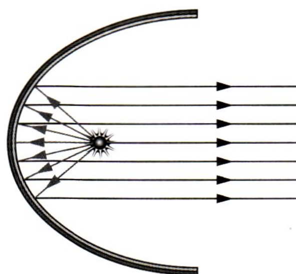
274 pav.




275 pav.




276 pav.



277 pav.

Spinduliai, lygiagretūs su šalutine optine ašimi, kertasi šalutiniame židinyje $F_1$ (274 pav., *b*).

Taigi įgaubtieji veidrodžiai yra *glaudžiamíeji*, jų židinyje sutelktais spinduliais galima uždegti popierių ar kitas degias medžiagas.

Iškilieji veidrodžiai yra *sklaidomíeji*, nuo jų atsispindėję lygiagretūs spinduliai išsklaidomi (275 pav.). Tačiau brėžinyje, pratęsti už veidrodžio, šie spinduliai kertasi viename taške *F*, kuris vadinamas veidrodžio židiniu, tačiau tai yra tik tariamasis (menamas) židinys, nes už veidrodžio jokių spindulių nėra. **Iškilojo veidrodžio pagrindinio židinio nuotolį *OF* tenka laikyti neigiamuoju, nes židinys yra priešingoje veidrodžio pusėje negu šviesos šaltinis.**

Krintantis į rutuliškąjį veidrodį spindulys ir atsispindėjęs spindulys yra apgręžiami. Todėl šviesos šaltiniui esant įgaubtojo veidrodžio pagrindiniame židinyje, atsispindėję spinduliai sklinda lygiagrečiu su pagrindine optine ašimi pluoštu (276 pav.). Praktikoje lygiagrečių spindulių pluoštams sudaryti naudojami ne rutuliškieji, o *parãboliškieji véidrodžiai*. Jų atspindintis paviršius *parabolóidas* gaunamas sukantis parabolei apie savo simetrijos ašį.

Be rutuliškųjų ir paraboliškųjų veidrodžių, dar naudojami *hiperboliškàsis ir elipsiškàsis véidrodžiai*. Rutuliškieji veidrodžiai tiksliausiai suformuoja lygiagrečių spindulių pluoštą, todėl jie naudojami įvairių prožektorių reflektoriams (atspindintiems paviršiams) gaminti (277 pav.).

Rutuliškaisiais veidrodžiais gaunami kitokie atvaizdai negu plokščiajame veidrodyje – jie iškreipti, padidinti arba sumažinti, taip pat gali būti prieš veidrodį arba už jo, tikri ir menami.

Dangaus kūnų šviesą surenka (rutuliškuoju arba paraboliškuoju veidrodžiu) veidrodinis teleskopas. Moderniuose teleskopuose įgaubtais veidrodžiais sutelkiamas silpnas tolimos žvaigždės spinduliavimas. Sutelktos šviesos kiekis proporcingas veidrodžio skersmens kvadratui, todėl silpniems ir labai nutolusiems dangaus šviesuliams tirti gaminami kiek įmanoma didesnio skersmens teleskopai. Didžiausias pasaulyje 6 m skersmens veidrodinis teleskopas sumontuotas Zelenčiuko observatorijoje Šiaurės Kaukaze, 2070 m aukštyje virš jūros lygio. Lietuvoje, Molėtų observatorijoje ant Kaldinių kalno, įrengtas 1,65 m skersmens veidrodinis teleskopas.

## Klausimai ir užduotys

**1. Iš projekcijos aparato horizontalia kryptimi sklinda lygiagrečių šviesos spindulių pluoštas. Kaip reikia padėti plokščiąjį veidrodį, kad atsispindėjęs pluoštas sklistų vertikaliai? Nubraižykite brėžinį ir paaiškinkite atsakymą.**

**2. Šviesos spindulys krinta į plokščiąjį veidrodį 35° kampu. Kam lygus kampas tarp krintančiojo ir atsispindėjusio spindulio? Kam lygus atspindžio kampas? Nubraižykite brėžinį.**

**3. Kampas tarp krintančiojo ir atsispindėjusio spindulio lygus 30°. Koks bus atspindžio kampas, kai kritimo kampas padidės 15°?**

**4. Iškiluoju rutuliškuoju veidrodžiu, kurio kreivumo spindulys 4 m, gaunamas menamasis daikto atvaizdas. Kokiu atstumu nuo veidrodžio yra daiktas, kai atstumas tarp veidrodžio ir daikto atvaizdo lygus 1 m?**

**5. Įgaubtojo veidrodžio kreivumo spindulys 48 cm. Koks yra to veidrodžio židinio nuotolis?**

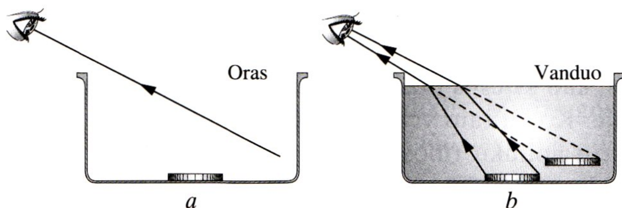
**6. Įgaubtojo rutuliškojo veidrodžio, kurio kreivumo spindulys 1,6 m, pagrindinėje optinėje ašyje įtaisytas taškinis šviesos šaltinis. Menamasis to šaltinio atvaizdas susidaro už veidrodžio, 70 cm atstumu nuo jo. Kurioje ašies vietoje yra šaltinis?**

# 117. Šviesos lūžis. Lūžio dėsniai

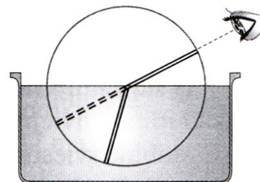
Skaitydami įžangoje apie šviesos prigimties aiškinimo istorinius faktus ir jos reiškinių mokslinį pagrindimą, supratote, kad šių dėsnių atradimo keliai buvo ganėtinai painūs, bet ir įdomūs bei paskatinantys ieškoti naujų mokslo tiesų.

Pirmosios „Optikos“ kūrėjas Euklidas spindulių lūžio dėsnio dar nežinojo, nors šį reiškinį jau tyrė. Vieną iš optikos postulatų jis formulavo taip: „Jei kokį nors daiktą padėsime indo dugne ir atitrauksime indą nuo akių tiek, kad to daikto nebematysime, tai jis vėl bus matomas iš to paties atstumo, kai į indą įpilsime vandens“ (278 pav.).

Žymiausias antikos astronomas Ptolemėjas šį dėsnį stengėsi nustatyti eksperimentiškai. Jį domino vienas iš pagrindinių to amžiaus filosofams iškilusių klausimų – kaip pakinta žvaigždžių padėtis dangaus skliaute dėl spindulių lūžio atmosferoje. Tuo tikslu Ptolemėjas pagamino paprastą prietaisą, sudarytą iš medinio skritulio su laipsnių skale pakraščiuose ir dviejų liniuočių: vienos, pritvirtintos nejudamai prie skritulio, ir kitos, besisukančios apie jo centrą (279 pav.). Skritulys būdavo ligi pusės panardinamas į vandenį ir, žiūrint judamosios liniuotės kryptimi,



278 pav.


279 pav.

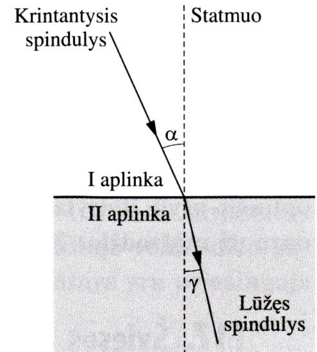
ji būdavo pasukama taip, kad atrodytų esanti liniuotės, panardintos į vandenį, tęsinys. Iš tikrųjų dėl spindulių lūžio, pereinant iš oro į vandenį, tos liniuotės sudarė tam tikrą kampą, kuris ir būdavo nustatomas ištraukus skritulį iš vandens. Deja, remdamasis gautais rezultatais, Ptolemėjas nustatė netikslų dėsnį, kad lūžio kampo ir kritimo kampo santykis yra pastovus (taip būna tik esant mažiems kampams). Šiuo dėsniu buvo naudojamasi ilgus amžius, net ir pastebėjus, jog jis yra apytikslis.

Apie 1621 m. Leideno universiteto profesorius Vilebordas Snelas (*Snell*) nustatė lūžio dėsnį, kuris buvo rastas jo darbų rankraščiuose po ankstyvos mokslininko mirties (sulaukus vos 36 metų). Snelo rankraščiuose aptiktas dėsnis mums yra gerai žinomas ir užrašomas tokia matematine lygtimi:

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}; \qquad (273)$$

čia $\alpha$ – šviesos spindulio kritimo kampas, $\gamma$ – lūžio kampas (280 pav.), o $n$ – pastovus dydis, vadinamas **santykiniù lū̃žio rodikliù (antrosios aplinkos lūžio rodikliu pirmosios aplinkos atžvilgiu)**. Jis išreiškiamas pirmosios ($n_1$) ir antrosios ($n_2$) aplinkų lūžio rodikliais oro atžvilgiu:

$$n = \frac{n_2}{n_1}. \qquad (274)$$



280 pav.

Šį dėsnį Snelas nustatė, analizuodamas matavimų rezultatus, bet atradimo aplinkybės liko nežinomos. Rankraštį matė K. Hiuigensas ir kiti fizikai, tačiau vėliau jis kažkur dingo, nespėjus jo paskelbti. Dėsnį teoriškai išvedė garsus filosofas, fizikas ir matematikas Renė Dekartas. Manoma, kad jam buvo žinomas Snelo rezultatas, todėl teoretikui nebuvo sunku apdoroti savo eksperimentinius rezultatus.

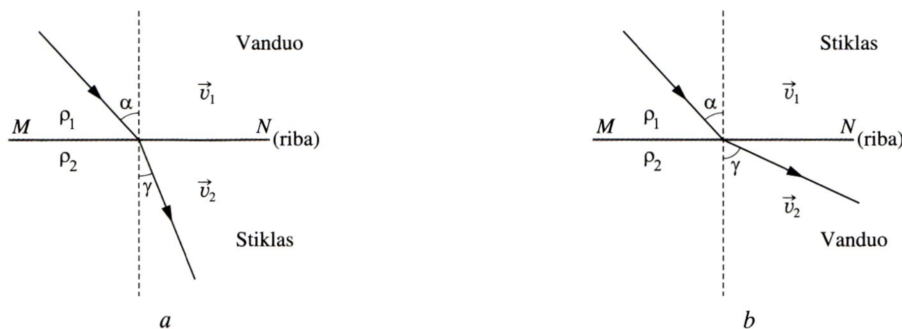
Dekartas tyrinėjo kamuoliuką, metamą į vandenį. Kamuoliuko greitį jis išskaidė į dvi dedamąsias – horizontalią bei vertikalią vandens paviršiui ir manė, kad dviejų aplinkų riboje keičiasi tik vertikali dedamoji. Gautą dėsnį Dekartas apibendrino ir šviesai. Toks apibendrinimas nėra tikslus, kadangi Dekartas šviesos greitį laikė begaliniu, o tokiu atveju skaidymas į dedamąsias nėra pagrįstas.

Netrukus vienas iš prancūzų matematikų – Pjeras Ferma (*Fermat*) – sukritikavo Dekarto prielaidas ir pateikė šio dėsnio įrodymą. Ferma, remdamasis filosofiniu principu, kad gamtoje viskas vyksta ekonomiškiausiu būdu, išvedė fizikinį principą: **šviesos spindulys tarp dviejų taškų sklinda tuo keliu, kuriame jis užtrunka mažiausiai laiko.** O iš šio principo išvedė patį lūžio dėsnį.

Tikraisiais lūžio dėsnio atradėjais tapo patys pirmieji šio dėsnio skelbėjai – Snelas ir Dekartas.

Iš šių samprotavimų matome, kad **šviesos lūžis – tai šviesos spindulio krypties pasikeitimas dviejų aplinkų riboje**. Kodėl taip yra? Atsakymą į šį klausimą galima rasti stebint šviesos sklidimą įvairių aplinkų ribose.

**Aplinkų, kuriomis sklinda šviesa, tankiai yra nevienodi, todėl ir šviesos sklidimo greitis jose yra skirtingas.**




281 pav.

Vadinasi, kintant šviesos greičiui dviejų aplinkų riboje, keičiasi ir jos sklidimo kryptis.

Tarkime, kad šviesa pereina iš vandens į stiklą (281 pav., *a*). Vandens tankį pažymėkime $\rho_1$ ir jame sklindančios šviesos greitį – $v_1$, stiklo tankį pažymėkime $\rho_2$, šviesos greitį stikle – $v_2$. Dviejų aplinkų skiriamoji riba – *MN*. Kadangi stiklo tankis didesnis už vandens tankį ($\rho_2 > \rho_1$), tai stikle šviesa sklis mažesniu greičiu negu vandenyje ($v_2 < v_1$). Atlikę eksperimentą, matome, kad dviejų aplinkų riboje pakinta šviesos sklidimo kryptis.

Medžiagos tankio ir šviesos greičio sklidimą toje medžiaginėje aplinkoje galima išreikšti tokia priklausomybe:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{v_2}{v_1}. \qquad (275)$$

Iš 281 pav., *a* matyti, kad, šviesai pereinant iš retesnės aplinkos į tankesnę, spindulys lūžta artėdamas link statmens.

Krintantysis ir lūžęs spinduliai, kaip ir atspindžio atveju, yra apgręžiami. Šviesos spindulių apgręžiamumas šiuo atveju reiškia, kad, šviesai pereinant iš stiklo į vandenį (281 pav., *b*), lūžio kampas γ bus didesnis už kritimo kampą α. Iš to išplaukia, kad, **pereinant šviesai iš tankesnės aplinkos į retesnę, šviesos spindulys lūžta toldamas nuo statmens**.

Remiantis 281 paveikslu, *b*, galima užrašyti, kad $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{v_2}{v_1}$, $\rho_1 > \rho_2$, o $v_1 < v_2$; čia $\rho_1$ – stiklo tankis, $\rho_2$ – vandens tankis, $v_1$ – šviesos greitis stikle, $v_2$ – šviesos greitis vandenyje.

Fizikinis dydis, rodantis kiek kartų šviesos greitis vakuume yra didesnis negu nagrinėjamoje aplinkoje, vadinamas *absoliučiúoju šviesõs lū̃žio rodikliù n*:

$$n = \frac{c}{v}. \qquad (276)$$

Jo reikšmės randamos lentelėse. Kuo medžiagos tankis yra didesnis, tuo didesnis ir jos absoliutusis lūžio rodiklis. Medžiagos, kurių lūžio rodikliai yra didesni, vadinamos optiškai tankesnėmis medžiagomis. Jose šviesa sklinda mažesniu greičiu:

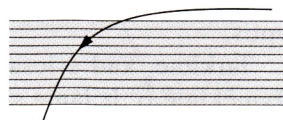
$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1}. \qquad (277)$$

Nagrinėdami šviesos spindulių sklidimą optiškai skirtingose aplinkose, palyginame ne jų nueitus geometrinius, bet optinius kelius. Kai per laiką $t$ vakuume šviesa nusklinda nuotolį $l = ct$, tai per tą patį laiką aplinkoje, kurios lūžio rodiklis $n_1 = \frac{c}{v_1}$, ji nusklis tik nuotolį $l_1 = v_1 t$, o aplinkoje, kurios lūžio rodiklis $n_2 = \frac{c}{v_2}$, – nuotolį $l_2 = v_2 t$. Taigi

$$\frac{l}{c} = \frac{n_1 l_1}{c} = \frac{n_2 l_2}{c}. \quad (278)$$

**Šviesos nueito kelio ilgio $l$ ir aplinkos lūžio rodiklio $n$ sandauga $nl$ išreiškia optinį kelią. Ir tik šviesos nueiti per tam tikrą laiką optiniai, bet ne geometriniai keliai yra lygūs.**

Keičiantis medžiagos temperatūrai bei jos tankiui, kinta ir jos lūžio rodiklis. Kai pastarasis kinta tolygiai, tai, sklisdamas pro tokią medžiagą, šviesos spindulys išsilenkia. Panašiai kartais sklinda šviesos spindulys oro atmosferoje (282 pav.), kai, atsispindėjęs aukštesniuose oro atmosferos sluoksniuose, grįžta atgal į žemę. Tokiu šviesos spindulių kreivaeigiu sklidimu aiškinami *mirãžo* („fata morgana") reiškiniai.



282 pav.

Kaitrią vasaros dieną artimi žemės paviršiui oro sluoksniai įšyla daugiau, jie darosi retesni ir kyla aukštyn, o šaltesnio oro sluoksniai leidžiasi žemyn. Todėl galime matyti atskirus oro sluoksnius, kuriuose dėl nuolatinio bei netaisyklingo oro lūžio rodiklio kitimo stebimas atvaizdo mirguliavimas. Panašiai galime stebėti ir atskirus skysčio tirpalo sluoksnius, kai tirpalo koncentracija nėra vienoda. Žvaigždžių mirgėjimą šaltą žiemos naktį taip pat aiškiname oro sluoksnių lūžio rodiklio kitimu.

Į 274 formulę įrašę 277 išraišką, gauname santykinio lūžio rodiklio priklausomybę nuo šviesos sklidimo greičio nagrinėjamose aplinkose:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (279)$$

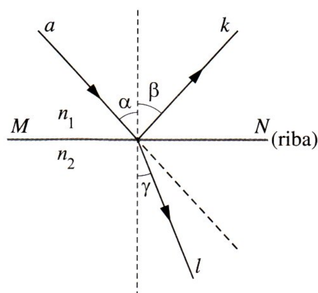
Taigi **santykinis lūžio rodiklis parodo, kiek kartų šviesos greitis pirmojoje aplinkoje skiriasi nuo jos greičio antrojoje aplinkoje.**

**Aplinka, kurios santykinis lūžio rodiklis lygus 1 ($n_{21} = 1$), vadinama vienalyte** ir, kaip jau žinome, tokioje aplinkoje šviesa sklinda tik tiesiomis linijomis.

Apibendrindami eksperimentų rezultatus (283 pav.), galime suformuluoti šviesos lūžio dėsnius:

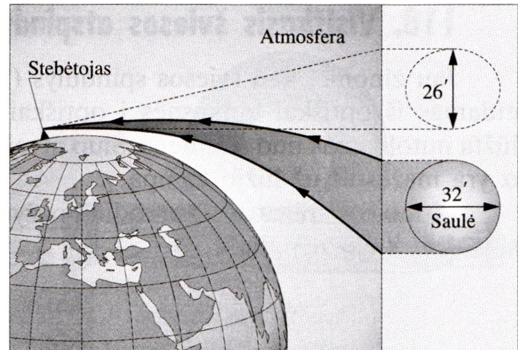
**1) krintantysis (*a*) ir lūžęs (*l*) spinduliai bei kritimo taške iškeltas statmuo (dviejų aplinkų ribai) yra vienoje plokštumoje;**

**2) kritimo kampo $\alpha$ ir lūžio kampo $\gamma$ sinusų santykis yra pastovus dydis, lygus santykiniam šviesos lūžio rodikliui:** $\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = n_{21}$.




283 pav.

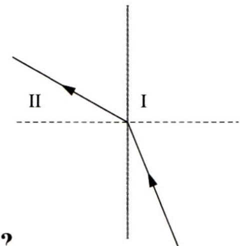
Žemės atmosfera yra optiškai nevienalytė, todėl šviesa joje sklinda kreiva trajektorija. **Spindulių sklidimo krypties pakitimas dėl jų lūžimo atmosferoje vadinamas šviesõs refrãkcija.** Dėl astronominės refrakcijos Saulės arba Mėnulio skritulys prie pat horizonto atrodo suplotas: vertikalusis Saulės disko skersmuo matomas 26′ kampu, o horizontalusis – 32′ kampu. Taip yra todėl, kad Saulės spindulys, sklindantis nuo viršutinio jos disko krašto, yra toliau nuo horizonto linijos ir mažiau užlinksta nei nuo apatinio krašto sklindantis spindulys (kai Saulė yra zenite, refrakcija nevyksta). Dėl refrakcijos Saulė ir kiti šviesuliai matomi virš horizonto tada, kai jie dar nepatekėję ar jau nusileidę (284 pav.). Grožėdamiesi saulėlydžiu stebime, kaip apatinis šviesulio kraštas paliečia horizontą, tuomet iš tikrųjų visas Saulės diskas jau slepiasi žemiau horizonto linijos... Todėl dėl šviesos refrakcijos šviesioji paros dalis šiek tiek pailgėja.




284 pav.

Šviesos refrakcijos reiškiniu paaiškinami danguje retsykiais pasirodantys vadinamieji *aukštieji miražai*. Ją taip pat patiria ir radijo bangos, sklisdamos skirtingo jonizacijos laipsnio žemės atmosferos sluoksniuose.

## Klausimai ir užduotys




**1. Paveiksle pavaizduotas šviesos spindulio lūžimas dviejų aplinkų riboje. Kuri aplinka yra optiškai tankesnė?**

**2. Kuriais atvejais lūžio kampas lygus kritimo kampui?**

**3. Kodėl sutrintas į miltelius stiklas neblizga?**

**4. Kodėl žvaigždės mirga?**

**5. Kodėl iš akies įvertintas upės gylis visada būna mažesnis už tikrąjį?**

**6. Kodėl iš terpentino į gliceriną šviesa pereina nelūždama?**

**7. Siauras šviesos pluoštas pereina iš oro į skystį. Pluošto kritimo kampas lygus 30°, o lūžio kampas – 15°. Apskaičiuokite skysčio lūžio rodiklį.**

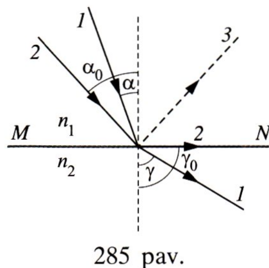
**8. Saulės spinduliai krinta į vandens pripiltą dubenį. Apskaičiuokite tų spindulių: a) lūžio kampą, kai kritimo kampas 25°; b) kritimo kampą, kai lūžio kampas 42°; c) kritimo ir lūžio kampą, kai atspindžio kampas 45°; d) kritimo į horizontalų dubens dugną, kai kritimo į vandens paviršių kampas lygus 45°.**

**9. Šviesos spindulys pereina iš oro į stiklą ($n$ = 1,5). Kampas tarp atsispindėjusio ir lūžusio spindulio lygus 90°. Apskaičiuokite kritimo ir lūžio kampą.**

**10. Šviesos spindulys krinta į dviejų aplinkų ribą 30° kampu. Pirmosios aplinkos lūžio rodiklis 2,2. Koks yra antrosios aplinkos lūžio rodiklis, jeigu atsispindėjęs ir lūžęs spindulys vienas kitam statmeni?**

**11. Narui, esančiam po vandeniu, atrodo, kad Saulės spinduliai krinta į vandens paviršių 60° kampu. Kokiu kampu Saulė pakilusi virš horizonto?**

## 118. Visiškasis šviesos atspindys



285 pav.

Jau žinome, kad šviesos spindulys (285 pav., *1*), pereidamas iš optiškai tankesnės į optiškai retesnę aplinką, lūžta nutoldamas nuo statmens. Šiuo atveju kritimo kampas $\alpha$ yra mažesnis už lūžio kampą $\gamma$.

Pirmosios aplinkos lūžio rodiklį pažymėkime $n_1$, antrosios – $n_2$ $(n_1 > n_2)$. Tada

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{n_2}{n_1} < 1. \qquad (280)$$

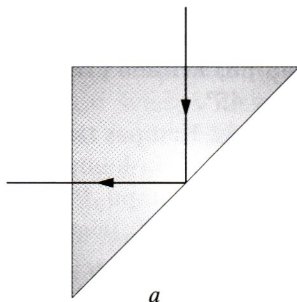
Didinant kritimo kampą $\alpha$, didės ir lūžio kampas $\gamma$. Esant tam tikram kritimo kampui $\alpha_0$, lūžio kampas lygus $\gamma = \frac{\pi}{2}$. Tada lūžęs spindulys *2* šliaužia abiejų aplinkų skiriamuoju paviršiumi. Šiuo atveju $\sin\gamma = 1$ ir

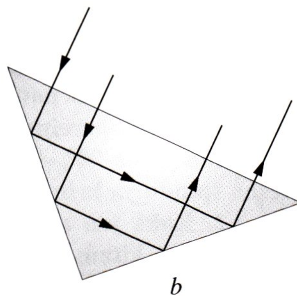
$$\sin\alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}. \qquad (281)$$

Padidinus (kad ir be galo mažai) kampą $\alpha_0$, lūžęs spindulys *3* turėtų eiti jau pirmąja aplinka. Tada jis atsispindi nuo skiriamojo paviršiaus pagal šviesos atspindžio dėsnį. *Reiškinys, kuriam esant šviesos spindulys, krintantis į dviejų aplinkų skiriamąjį paviršių, lūžęs sklinda paviršiaus skiriamąja riba, vadinamas vìsiškuoju šviesõs ãtspindžiu, o kritimo kampas, kuriam esant šis reiškinys įvyksta, vadinamas ribiniù vìsiškojo ãtspindžio kampù.* Pastarąjį kampą apibūdina 281 lygtis.

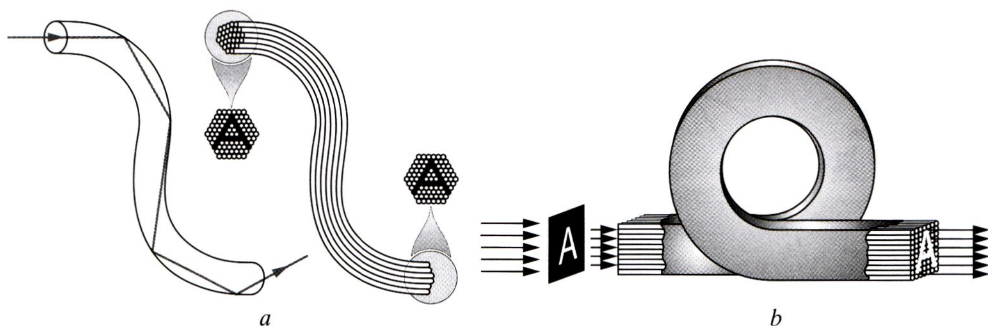
Iš šių stebėjimų galima padaryti išvadą, kad **su vidaus atspindžio reiškiniu susiduriama tik tuo atveju, kai šviesa pereina iš optiškai tankesnės aplinkos į retesnę aplinką. Visiškai atsispindi tik tie spinduliai, kurie krinta į dviejų aplinkų ribą kampu, didesniu už ribinį.** Vandeniui ribinis kampas lygus 48°35′, o stiklui – 41°51′.

Kai šviesos spindulys krinta į stačiakampės prizmės įstrižainę kampu, didesniu už ribinį kampą, tai, visiškai nuo jos atsispindėjęs, pakeičia savo sklidimo kryptį (286 pav., *a*). O kritęs statmenai į įstrižainę (286 pav., *b*), jis visiškai atsispindi nuo abiejų statmenų plokštumų ir išeina iš prizmės, pakeitęs savo pirminę sklidimo kryptį 180° kampu. Stačiakampės prizmės naudojamos spindulių sklidimo krypčiai


*a*


*b*

286 pav.




287 pav.

pakeisti *monochromãtoriuose, periskòpuose, prìzminiuose žiūrõnuose* ir kt. Prizminiuose žiūronuose visiško atspindžio prizmėmis paverčiamas daiktų atvaizdas.

Visiškuoju vidaus atspindžiu aiškinamas brangakmenių žėrėjimas, vandenyje panirusių oro burbuliukų blizgėjimas, apverstų miražų susidarymas, lanksčių šviesolaidžių veikimas ir kt.

Nušlifuotas deimanto kristalas vadinamas *briliántu*. Šlifuojant deimantą, jo sienelės išdėstomos taip, kad šviesos pluoštas briliante patirtų visišką vidaus atspindį. Dėl šviesos dispersijos kristalo viduje briliantas švyti vaivorykštės spalvomis.

Pastaraisiais metais vis plačiau technikoje ir buityje diegiami *šviesõlaidžiai* (optiniai kabeliai) (287 pav., *a*). Naujas optikos skyrius – *plúoštinė òptika* – nagrinėja šviesos, vaizdo, garso ir kitokios informacijos perdavimo šviesolaidžiais būdus. Šviesolaidis sudarytas iš vienos ar daugelio skaidrių, lanksčių gijų, įvilktų į ploną apvalkalą, kurio lūžio rodiklis mažesnis negu gijos kanalo. Dėl visiškojo šviesos atspindžio šaltinio šviesa sklinda gijomis, atsispindėdama net nuo į žiedą susukto šviesolaidžio sienelių (287 pav., *b*). Šviesolaidžio gijos daromos iš stiklo, kvarco, organinio stiklo ir kitų medžiagų, kurių didelis lūžio rodiklis. Gijos skersmuo gali būti nuo keleto milimetrų iki keleto mikrometrų priklausomai nuo šviesolaidžio paskirties. Gijos apvalkalas daromas iš polimerinės medžiagos, kurios lūžio rodiklis yra mažas. Šviesolaidyje būna nuo keliolikos iki kelių šimtų tūkstančių gijų, nes **kuo mažesnis gijos skersmuo ir kuo glaudesnis gijų pluoštas, tuo didesnė šviesolaidžio skiriamoji geba.**

Medicinoje, apšviečiant šviesolaidžiais žmogaus vidaus organus, diagnozuojami jų sutrikimai.

Moduliuojant šviesos pluoštą, šviesolaidžiu kur kas kokybiškiau nei metaliniais laidais ir be trikdžių perduodami telefono pokalbiai, vaizdo, teksto įrašai ir kt.

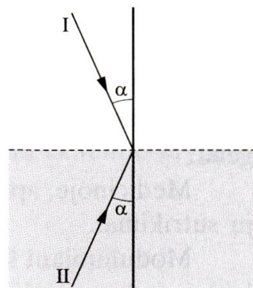
Šiuo metu Lietuvoje nutiesta daugiau nei 1500 km optinio kabelio linijų. Lietuva šviesolaidžiu yra sujungta su Lenkija, Latvija ir Baltarusija. 1997 m. vasarą Baltijos jūros dugnu nutiestas 243 km ilgio optinis kabelis sujungė Lietuvą su Švedija ir kitomis Skandinavijos šalimis. Naudojantis šiuo kabeliu vienu metu gali vykti 30 tūkstančių telefoninių pokalbių. Šviesolaidžių tinklas Lietuvoje sparčiai plečiamas ir nuolat atnaujinamas (288 pav.).

EUTELSAT
Danija KOPENHAGA
Latvija
NORSAT B
Norvegija OSLAS
INTERSAT
JAV
Švedija

- - - - - – naudojamos šviesolaidžio linijos – 686 km
——— – planuojamos nutiesti iki 1997 m. pabaigos – 800 km
— · — · – planuojamos nutiesti iki 1998 m. pabaigos
— ·· — ·· – planuojamos nutiesti iki 2000 m. pabaigos

288 pav.

## Klausimai ir užduotys




**1. Ar gali visiškai atsispindėti šviesa, pereinanti iš stiklo į vandenį?**

**2. Kodėl karštą dieną virš įkaitusios dirvos esančių daiktų kontūrai atrodo virpantys?**

**3. Kodėl nepatartina laistyti augalų karštą saulėtą dieną?**

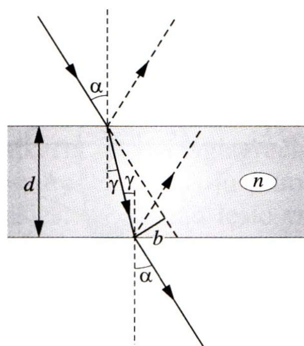
**4. Šviesos spinduliai (I ir II) krinta iš priešingų pusių į vandens paviršių 50° kampu. Kokiais kampais jie lūžta? Vandens lūžio rodiklis lygus 1,33.**

**5. Apskaičiuokite ribinį visiškojo atspindžio nuo organinio stiklo kampą ($n$ = 1,5).**

**6. Ar išeis šviesos spindulys iš vandens į orą, jeigu jo kritimo kampas lygus 45°; 50°?**

**7. Kas atsitiks spinduliui, krintančiam 75° kampu į stiklo ir ledo ribą?**

# 119. Šviesos spindulių eiga lygiagrečių sienelių plokštelėje ir prizmėje

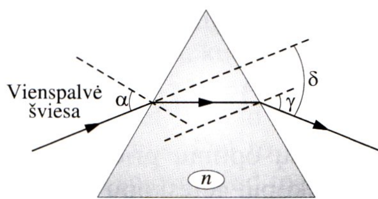


289 pav.

289 paveiksle pavaizduotas vienspalvės (monochromatinės) šviesos perėjimas per lygiagrečių sienelių plokštelę. Punktyrinės rodyklės žymi atspindėtus spindulius. Taigi plokštelę perėjęs šviesos spindulys sklinda ta pačia kryptimi, kaip ir krintantysis, tik pasislinkęs atstumu $b$:

$$b = \frac{d \cdot \sin(\alpha - \gamma)}{\cos\gamma}. \qquad (282)$$

Vadinasi, **kuo didesnis plokštelės storis $d$ ir šviesos kritimo kampas $\alpha$, tuo daugiau pasislenka spindulys. Poslinkio dydis priklauso ir nuo šviesos lūžio rodiklio $n$ (nuo jo priklauso lūžio kampas $\gamma$).**



290 pav.

Vienspalvei šviesai pereinant per trikampę prizmę (290 pav.), kurios medžiaga optiškai tankesnė už supančią aplinką, šviesos spinduliai pakrypsta prizmės pagrindo link. Spindulių nuokrypio kampas δ lygus:

$$\delta = \alpha + \gamma - \varphi; \qquad (283)$$

čia $\varphi$ – prizmės laužiamasis kampas. Nuokrypio kampas yra mažiausias, kai spindulys prizmėje lygiagretus su jos pagrindu ir kai lūžio kampas $\beta$ lygus kritimo kampui $\alpha$. Tuomet

$$\delta_{min} = \varphi(n - 1); \qquad (284)$$

čia $n$ – šviesos lūžio rodiklis prizmėje.

Prizmės naudojamos spektroskopuose, periskopuose, žiūronuose ir kitur.

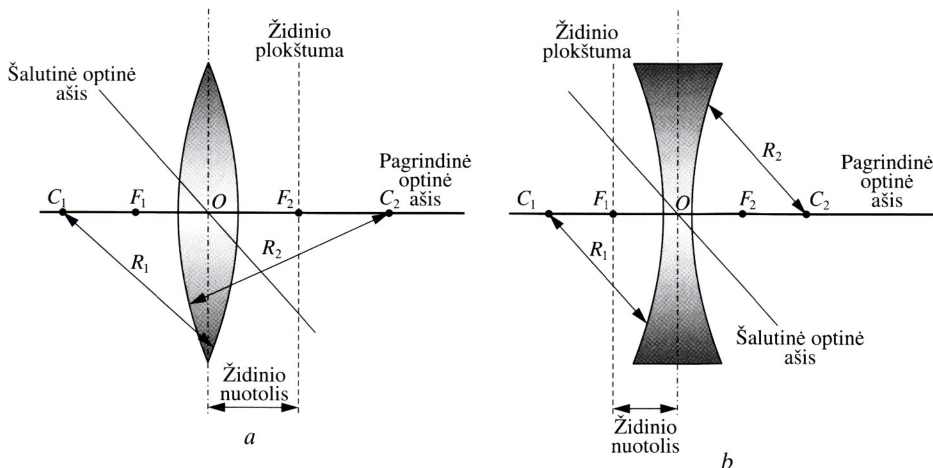
## Klausimai ir užduotys

**1. Kiek pasislinks spindulys, pereidamas lygiagrečių sienelių stiklo plokštelę, kurios storis $d$ = 10 cm, jei kritimo kampas lygus 70°, o stiklo lūžio rodiklis – 1,5?**

**2. Šviesos spindulys 36° kampu krinta į kvarco prizmę. Prizmės laužiamasis kampas $\varphi$ = 40°. Apskaičiuokite išeinančio iš prizmės spindulio lūžio ir nuokrypio kampus. Šviesos lūžio kvarco stikle rodiklis yra 1,54. Kam lygus mažiausias nuokrypio kampas?**

**3. Vienspalvės šviesos spindulys išeina iš prizmės kampu, lygiu kritimo kampui. Jos nuokrypio kampas lygus 15°, laužiamasis kampas – 48°. Iš kokios medžiagos prizmė pagaminta?**

**4. Vienspalvė šviesa pereina trikampę prizmę, kurios laužiamasis kampas $\varphi$ = 60°, o šviesos lūžio joje rodiklis $n$ = 1,7. Spinduliai prizmėje lygiagretūs su jos pagrindu. Apskaičiuokite spindulio nuokrypio kampą.**




291 pav.

## 120. Lęšiai. Vaizdų braižymas lęšiuose

Visų optinių prietaisų pagrindinė dalis yra *lę̃šis*. Iš jų sudaryti fotoaparatų, mikroskopų, teleskopų objektyvai, snaiperių šautuvų ir tankų pabūklų taikikliai, povandeninių laivų periskopai, galingi palydovų teleobjektyvai ir galiausiai – daugelio mūsų akiniai.

**Lęšiu vadinamas šviesai skaidrus kūnas, kurį nuo aplinkos skiria du rutuliškieji paviršiai** (vienas jų gali būti plokščias). Lęšiai dažniausiai gaminami iš stiklo.

Pagal savo išvaizdą ir formą lęšiai skirstomi į *iškiliúosius* (glaudžiančiuosius) (291 pav., *a*) ir *įgaubtúosius* (sklaidomuosius) (291 pav., *b*). Iškilieji lęšiai ties viduriu storesni, įgaubtieji – plonesni. Iškilasis lęšis savo forma ir optinėmis savybėmis panašus į dvi trikampes prizmes suglaustais pagrindais. Jos kreipia šviesos spindulius link pagrindo. Iškilasis lęšis šviesos spindulius glaudžia į vieną tašką, todėl jis dar vadinamas *glaudžiamúoju* lęšiu. Įgaubtasis lęšis šviesos spindulius išbarsto (išsklaido).

Kad sugebėtume braižyti šviesos spindulių eigą lęšiuose ir galėtume suvokti daikto atvaizdų susidarymo juose ypatumus, susipažinkime su pagrindiniais lęšių elementais (291 pav.).

$R_1$ ir $R_2$ yra lęšio paviršių kreivumo spinduliai. **Tiesė, einanti per rutuliškųjų paviršių centrus $C_1$ ir $C_2$ bei optinį centrą $O$, vadinama pagrindinè òptine ašimì. Bet kuri tiesė, einanti per optinį centrą ir nesutampanti su pagrindine ašimi, vadinama šalutinè òptine ašimì.** Taškas $F$ vadinamas *lę̃šio žìdiniu*. **Pagrindinės optinės ašies taškas, kuriame susirenka lęšį perėję spinduliai (ar jų tęsiniai), į lęšį kritę lygiagrečiai su pagrindine optine ašimi, vadinamas lęšio židiniu.** Glaudžiamojo lęšio židinys yra tikras, o sklaidomojo – menamas. Kiekvienam lęšiui būdingi du židiniai, esantys abipus jo. Atstumas nuo lęšio centro iki židinio vadinamas lęšio *žìdinio núotoliu OF*.

**Plokštuma, einanti per židinį statmenai pagrindinei optinei ašiai, vadinama žìdinio plókštuma.**

**Spindulys, sklindantis šalutine optine ašimi, nekeičia savo krypties. Lygiagretūs su juo spinduliai, perėję glaudžiamąjį lęšį, susikerta jo židinio plokštumoje** (292 pav.).

Lęšių sutartinis žymėjimas brėžiniuose pavaizduotas 293 paveiksle.

Paprastaisiais lęšiais gaunami atvaizdai nėra tobuli. Būdingiausi jų trūkumai – tai *sfèrinė aberãcija* (lot. *aberratio* – nukrypimas) ir *chromátinė aberãcija*.

Pirmasis trūkumas susidaro todėl, kad židinyje susikerta ne visi lygiagrečiai su pagrindine optine ašimi sklidę spinduliai, o tik labai siauras centrinis jų pluoštas. Juo labiau spinduliai nutolę nuo pagrindinės optinės ašies, tuo arčiau lęšio yra jų židinys. Dėl šios priežasties, sklindant plačiam spindulių pluoštui, lęšio sukurtas atvaizdas darosi miglotas ir neryškus.

Norint išvengti sferinės aberacijos, prieš lęšį pastatoma diafragma – ekranas su nedidele keičiamo skersmens angele spinduliams praeiti. Ji praleidžia tik tuos spindulius, kurie yra arti pagrindinės optinės ašies.

Naudojamas ir kitas būdas: kadangi glaudžiamųjų ir sklaidomųjų lęšių aberacijos yra priešingų ženklų, tai parenkama tokia dviejų lęšių sistema, kurių aberacijos kompensuojasi. Toks sudėtingesnis lęšis vadinamas **aplanatù** (294 pav.).

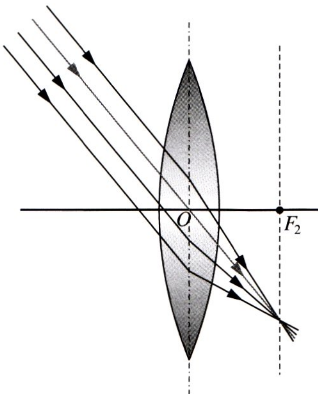
Antrasis trūkumas – chromatinė aberacija – atsiranda dėl to, kad natūralios šviesos spindulys lūžta lęšyje ir išsiskaido į spalvotus spindulius. Dėl to susidaręs daikto atvaizdas yra neryškus, o jo pakraščiai – vaivorykštės spalvų. Kad to nebūtų, reikia sudaryti lęšių sistemą iš įvairių stiklo rūšių, nevienodai išskaidančių natūralią šviesą. Tokia optinė lęšių sistema vadinama **achromatù**.

Visiems lęšių defektams panaikinti tenka konstruoti sudėtingas optines sistemas, susidedančias iš daugelio lęšių, kompensuojančių vienas kito trūkumus.

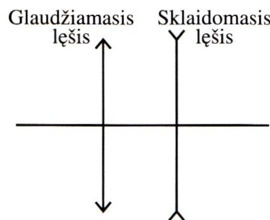
Sudėtingos optinės sistemos taikomos mokslo reikalams, palydovinei ir karo technikai. Jai projektuoti, gaminti ir derinti reikalingos išsamios teorinės žinios ir labai aukšta gamintojo kvalifikacija.

Žinant pagrindinių spindulių eigą lęšyje, galima nubraižyti juo gaunamus daikto atvaizdus. 295 paveikslo *a*, *b*, *c*, *d* dalyse pavaizduota, kaip braižomi daiktų, įvairiu atstumu nutolusių nuo lęšio, atvaizdai.

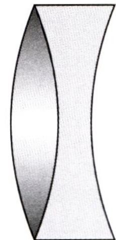
Kai daiktas nutolęs nuo lęšio labai dideliu atstumu $d$ ($d = \infty$), tai jo atvaizdas yra už lęšio atstumu $f$, lygiu židinio nuotoliui ($f = F$) (295 pav., *a*).

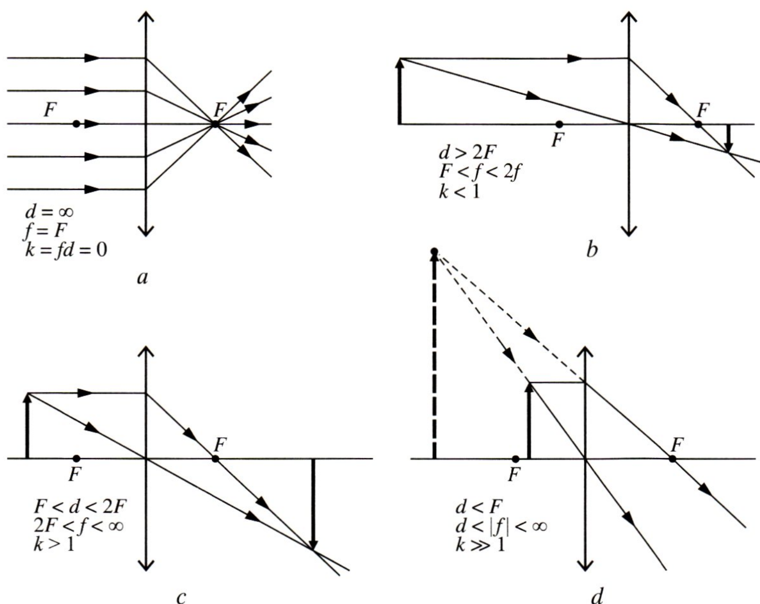


292 pav.



293 pav.


294 pav.



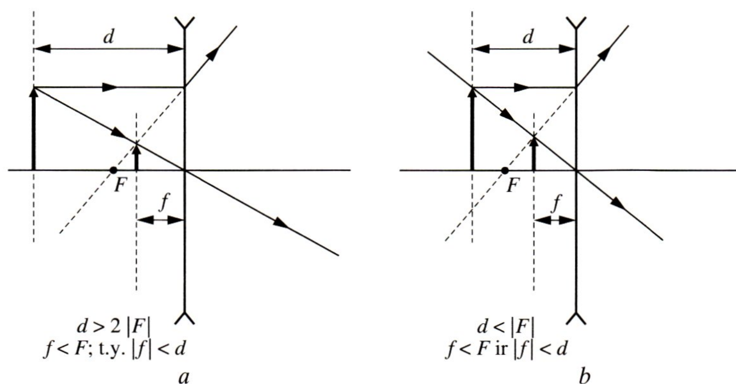

295 pav.

Vadinasi, su pagrindine optine ašimi lygiagretūs spinduliai, perėję lęšį, susirenka viename taške – lęšio židinyje. Iš Mėnulio ar Saulės atsklidę spinduliai nėra visiškai lygiagretūs su pagrindine optine ašimi, todėl jų atvaizdai būna disko formos.

Kai daiktas nutolęs nuo lęšio atstumu $d > 2F$ (295 pav., *b*), tai jo atvaizdas lęšyje bus tikras, apverstas ir sumažintas ($f < d$). Praktikoje šis atvejis dažnai pasitaiko fotografuojant.

Kai daiktas nutolęs nuo lęšio atstumu $F < d < 2F$ (295 pav., *c*), tai to daikto atvaizdas lęšyje bus tikras, apverstas ir padidintas ($f > d$).

Kai daiktas yra tarp lęšio ir jo židinio ($d < F$) (295 pav., *d*), tai jo atvaizdas bus menamas, neapverstas ir padidintas ($f > d$) toje pačioje lęšio pusėje, kurioje yra daiktas. Tokie atvaizdai gaunami lupa, kurios lęšio židinio nuotolis mažesnis negu 10 cm. Lupa laikoma prie pat akies. Jos didinimo koeficientas (žr. §121) siekia 25.



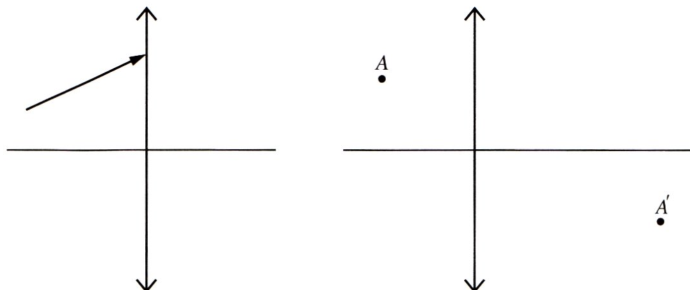

296 pav.

Sklaidomuoju lęšiu gaunamas daikto atvaizdas visada yra menamas, neapverstas ir sumažintas ($|f| < d$). Daiktas ir jo atvaizdas yra vienoje lęšio pusėje (296 pav., *a* ir *b*).

Lęšiai arba jų sistemos yra visų optinių prietaisų (fotoaparatų, projekcinių aparatų, teleskopų, grafoprojektorių ir t. t.), taip pat žmogaus akies optinės sistemos pagrindinė dalis.

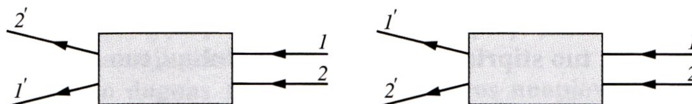
## Klausimai ir užduotys

**1. Spindulys sklinda pro ploną glaudžiamąjį lęšį nelygiagrečiai su pagrindine optine ašimi. Nubraižykite jo tolimesnę eigą.**



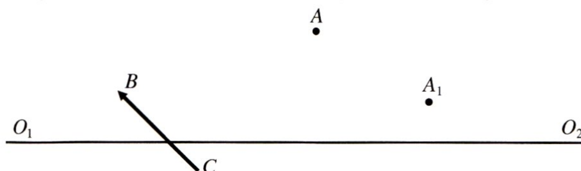

**2. Žinant daikto *A* ir jo atvaizdo *A′* vietą lęšio pagrindinės optinės ašies *MN* atžvilgiu, reikia rasti lęšio židinių vietą.**

**3. Kurioje dėžėje yra glaudžiamasis lęšis, kurioje – sklaidomasis? Grafiškai nustatykite kiekvieno tų lęšių optinį centrą ir židinį.**




**4. Kokiomis sąlygomis abipus iškilas lęšis virsta sklaidomuoju?**

**5. Brėžinyje pavaizduota lęšio pagrindinė optinė ašis $O_1O_2$, šviečiantis taškas *A* ir jo atvaizdas $A_1$. Kurioje vietoje yra lęšis? Koks jis? Nubraižykite rodyklės *BC* atvaizdą.**



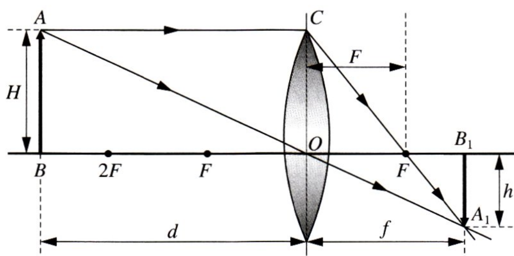

## 121. Lęšio formulė

Norint rasti daikto atvaizdą lęšyje, nebūtina kiekvieną kartą braižyti optinę schemą. Atvaizdo dydį ir vietą galima nustatyti matematiškai. Tam reikia žinoti formules, siejančias lęšio parametrus su daikto padėtimi.

Lęšio formulei išvesti pasinaudokime supaprastinta, 297 paveiksle pavaizduota spindulių eigos schema.

Daikto atstumą nuo lęšio $BO$ priimta žymėti raide $d$, o jo atvaizdo nuotolį nuo lęšio $B_1O$ – raide $f$. Pagrindinio židinio nuotolis $OF$ žymimas raide $F$, daikto aukštis $AB$ – raide $H$, o atvaizdo aukštis $A_1B_1$ – $h$.

Remiantis trikampių $ABO$ ir $A_1B_1O$ panašumu, galima parašyti:




297 pav.

$$\frac{H}{h}=\frac{d}{f}. \tag{285}$$

Trikampiai $COF$ ir $A_1B_1F$ taip pat panašūs, todėl $\frac{CO}{h}=\frac{OF}{FB_1}$. Tačiau $CO = AB = H$, o $FB_1 = f - F$.

Įvedus šiuos patikslinimus, gaunama: $\frac{H}{h}=\frac{F}{f-F}$.

Kadangi pastarųjų formulių kairiosios pusės yra lygios, tai lygios bus ir dešiniosios pusės: $\frac{d}{f}=\frac{F}{f-F}$. Iš čia gauname, kad $df - dF = fF$. Šios lygties visus narius padaliję iš $fdF$ ir panašius narius suprastinę, gausime plonojo lęšio formulę:

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{f}+\frac{1}{d}. \tag{286}$$

286 lygybės kairėje pusėje esantis narys yra **lęšio laužiamoji geba – fizikinis dydis, naudojamas įvairių lęšių optinėms savybėms palyginti, nes kuo trumpesnis lęšio židinio nuotolis, tuo stipriau lęšis laužia spindulius, tuo didesnė jo laužiamoji geba $D$**:

$$D=\frac{1}{F}. \tag{287}$$

Todėl 286 lygtį galime užrašyti ir kitaip: $D=\frac{1}{f}+\frac{1}{d}$.

**Fizikinis dydis, atvirkščias lęšio židinio nuotoliui, vadinamas lęšio laužiamąja gebà.**

Tarptautinėje SI vienetų sistemoje lęšio laužiamoji geba matuojama *diòptrijomis*: $[D]=\frac{1}{m}=\mathrm{m}^{-1}$. **Vienos dioptrijos laužiamąją gebą turi lęšis, kurio pagrindinio židinio nuotolis lygus 1 m.**

Lęšio laužiamoji geba priklauso nuo lęšio medžiagos lūžio rodiklio ir nuo jo paviršių kreivumo. Ši priklausomybė išreiškiama formule

$$D=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right); \tag{288}$$

čia $n$ – santykinis lūžio rodiklis; $R_1$ ir $R$ – lęšio paviršių kreivumo spinduliai.

Abipus iškilojo lęšio su vienodo kreivumo paviršių spinduliais laužiamoji geba bus užrašoma taip:

$$D = \frac{2(n-1)}{R}. \quad (289)$$

Iškilųjų paviršių kreivumo spinduliai, lęšio pagrindinio židinio nuotolis $F$, kartu ir laužiamoji geba $D$ yra teigiamieji dydžiai, o įgaubtųjų paviršių – neigiamieji dydžiai.

**Atvaizdo ir paties daikto tiesinių matmenų (aukščio) santykis vadinamas tiesiniù lęšio dìdinimu** ir žymimas raide $k$:

$$k = \frac{A_1B_1}{AB} = \frac{h}{H} \quad \text{arba} \quad k = \frac{f}{d}. \quad (290)$$

Šias matematines tiesinio didinimo išraiškas gauname iš jo apibrėžimo ir 285 lygties.

Lęšio formulė universali – ji tinka glaudžiamiesiems ir sklaidomiesiems lęšiams bei rutuliškiesiems veidrodžiams. **Būtina įsidėmėti, kad atstumai nuo optinio centro iki menamojo atvaizdo ir menamojo židinio yra neigiamieji dydžiai!**

## Klausimai ir užduotys

**1. Tuščiaviduris iškilasis lęšis, panardintas vandenyje, sklaido spindulius. Kodėl taip yra?**

**2. Jeigu atvaizdas padidintas ir neapverstas, tai ar jis tikras, ar tariamas (menamas)?**

**3. Abipus iškilojo lęšio kreivumo spinduliai yra 25 cm, o jo stiklo lūžio rodiklis 1,6. Kokia lęšio laužiamoji geba?**

**4. Indelis, kurio dugnas 12 cm spindulio sferos nuopjova, buvo pripiltas vandens. Vandeniui užšalus, susidarė plokščiai iškilas ledinis lęšis. Koks to lęšio pagrindinio židinio nuotolis?**

**5. Kiek kartų didina lupa, jeigu jos kreivumo spindulys 10 cm, o stiklo lūžio rodiklis 1,6?**

**6. Projektoriaus objektyvas, kurio židinio nuotolis 20 cm, nustatytas 6 m atstumu nuo ekrano. Kiek kartų projektorius didina?**

**7. Tarp lempos ir ekrano yra 3,2 m nuotolis. Kokiu atstumu nuo lempos turime pastatyti lęšį, kad gautume ryškų trigubai didesnį atvaizdą? Koks to lęšio židinio nuotolis?**

**8. Fotoaparatu, kurio objektyvo židinio nuotolis 50 mm, iš 500 m atstumo nufotografuotas televizijos bokštas. Kokio aukščio tas bokštas, jeigu kadre jo atvaizdo aukštis 36 mm?**

**9. 0,08 m aukščio daiktą reikia suprojektuoti į ekraną taip, kad jo atvaizdas būtų 2 m aukščio. Atstumas tarp objekto ir ekrano — 4 m. Koks turi būti objektyvo židinio nuotolis?**

**10. Sklaidomasis lęšis sudaro švytinčio taško atvaizdą perpus arčiau, negu yra tas taškas. Kam lygus atstumas nuo lęšio iki švytinčiojo taško, jeigu tas taškas yra ant lęšio optinės ašies, o lęšio laužiamoji geba 5 D?**

# 122. Akis – kaip optinė sistema. Akiniai

Žmogaus akis – viena tobuliausių optinių sistemų, žinomų fizikams. Akies lęšiuką valdo tam tikras raumenėlis, todėl akies „objektyvo" laužiamoji geba gali keistis nuo 58 iki 70 dioptrijų. Žiūrint į tolimus daiktus, lęšiukas tampa plokštesnis (labiau išsitempia) ir mažiau laužia spindulius, o stebint arčiau esančius daiktus, lęšiukas pasidaro iškilesnis ir smarkiau laužia pro jį einančius šviesos spindulius. **Akies lęšiuko savybė keisti židinio nuotolį vadinama akomodãcija** (lot. *accomodatio* – prisitaikymas). **Dėl akomodacijos skirtingu atstumu esančių daiktų atvaizdai būna ryškūs ir visada susidaro** toje pačioje vietoje – **akiẽs tinklaĩnėje**, kur išsidėsčiusios šviesai jautraus regėjimo nervo atšakos.

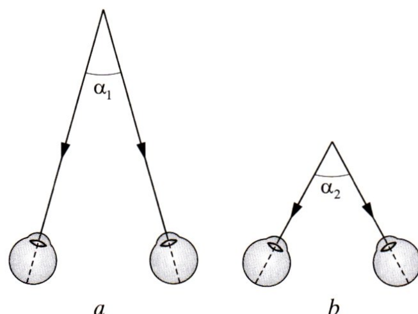
Akies akomodacija turi ribą, todėl labai arti esančių daiktų negalime aiškiai įžiūrėti (akies tinklainėje nesusidaro ryškus jų vaizdas).

Žmogaus akis prisitaiko ir prie skirtingos daiktų apšvietos. Jos jautrumas šviesai naktį milijardą kartų didesnis negu saulėtą dieną. **Akies savybė prisitaikyti prie įvairaus stiprio šviesos dirgiklių vadinama adaptãcija** (lot. *adaptare* – pritaikyti).

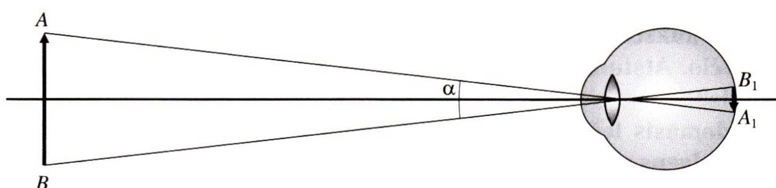
Adaptuotis padeda akies rainelė, kuri atlieka diafragmos vaidmenį, t. y. reguliuoja į akį patenkančios šviesos kiekį. Rainelė gali keisti akies vyzdžio skersmenį nuo 2 mm iki 8 mm. Kai šviesa itin ryški, regėjimo nervas nuo šviesos pertekliaus ekranuojamas tamsiais pigmentais, ir akies tinklainėje pakinta šviesai jautrios medžiagos koncentracija. Dėl akomodacijos žmogus gali normaliai matyti apšvietos diapazone nuo $10^{-5}$ lx iki $10^{5}$ lx.

Stebėdami daiktą, sukame akis taip, kad jų regėjimo ašys kirstųsi stebimame objekte. Pagal regėjimo ašių susikirtimo kampą, kitaip sakant, pagal akies obuolį valdančių raumenų įsitempimą smegenys įvertina atstumą iki daikto (298 pav., *a* ir *b*). **Akių gebėjimas pakreipti regėjimo ašis į stebimą objektą vadinamas konvergeñcija** (lot. *convergens* – suartėjantis).

Žiūrint išilgai gatvės, labiau nutolę namai atrodo mažesni už artimesnius. Tai nesunku paaiškinti, kadangi artimesnio namo atvaizdas tinklainėje susidaro didesnis negu tolimesnio. Atvaizdo dydis priklauso nuo regėjimo kampo α. Regėjimo kampą sudaro spinduliai, einantys nuo kraštinių daikto taškų per akies optinį centrą (299 pav.). Kad du taškus akis suvoktų kaip atskirus, atstumas tarp jų atvaizdų tinklainėje turi apimti ne mažiau kaip dvi nervines




298 pav.




299 pav.

galūnes. Regėjimo kampas tokiomis sąlygomis turi būti ne mažesnis už vieną minutę. Kuo didesnis regėjimo kampas, tuo daugiau nervinių galūnių apima daikto atvaizdas ir tuo ryškiau jis yra matomas.

Norint padidinti regėjimo kampą, tenka priartinti daiktą prie akies, tačiau, žiūrint į pernelyg artimus daiktus, akys greitai pavargsta, o arčiau kaip už 20 cm esančių daiktų normali akis iš viso negali aiškiai įžiūrėti.

**Regõs jautrùmo vienetu** (100%) medicinoje **laikomas gebėjimas išskirti du taškus, matomus vienos minutės kampu**. Kiek kartų mažiausias regėjimo kampas didesnis už minutę, tiek kartų regos jautrumas silpnesnis už normalų.

100% regos jautrumas leidžia matyti 1 cm dydžio raides iš 10 m nuotolio.

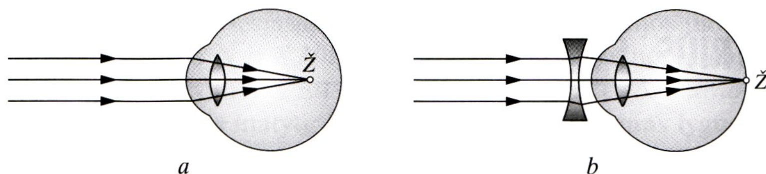
**Mažiausias atstumas *L*, kuriuo geriausiai matomas daiktas, vadinamas geríausio mãtymo núotoliu. Normaliai akiai jis maždaug lygus 25 cm**. Būtent tokiu atstumu nuo akių reikia laikyti skaitomą knygą, rašomą tekstą, rankdarbį.

Akims nepaprastai kenkia skaitymas gulint, prietemoje, važiuojant autobusu. Nesilaikant šių rekomendacijų, palaipsniui sutrinka akių optinė sistema: išsivysto *trumparegỹstė, toliaregỹstė, astigmatìzmas* ir kitos akių ligos.

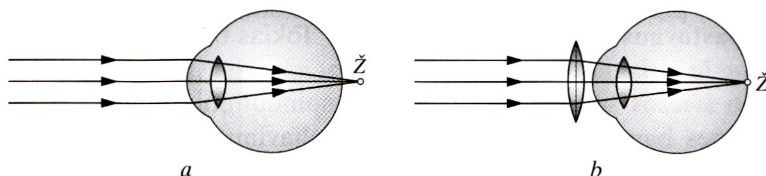
**Trumparegiai blogai mato tolimus daiktus** – apžiūrimą daiktą, skaitomą knygą jie priartina prie akių. Jų geriausio matymo nuotolis mažesnis negu 25 cm. *Trumparegystė – tai akies yda, dėl kurios atvaizdas susidaro ne akies tinklainėje, o šiek tiek arčiau.* Šis regėjimo defektas ištaisomas dėvint akinius su sklaidomaisiais lęšiais (300 pav., *a*, *b*).

**Toliaregiai blogai mato artimus daiktus**, todėl skaitomą tekstą stengiasi laikyti toliau. Toliaregių geriausio matymo nuotolis didesnis negu 25 cm. *Toliaregėje akyje atvaizdas susidaro už tinklainės.* Šiam regėjimo defektui ištaisyti dėvimi akiniai su glaudžiamaisiais lęšiais (301 pav., *a*, *b*).

**Akių astigmatizmas – tai yda, dėl kurios daiktų ir reginių kontūrai matomi neryškūs**. Pvz., šviesos taško atvaizdas yra ne taškas, o matoma kaip linija, elipsė arba tiesiog netaisyklingos formos dėmė. Dėl to astigmatizmas koreguojamas akiniais su storais, cilindriškai gaubtais stiklais.




300 pav.




301 pav.

## Klausimai ir užduotys

**1. Kodėl žmogui, žiūrinčiam išilgai geležinkelio, atrodo, kad bėgiai tolumoje artėja vienas prie kito?**

**2. 5,4 aukščio stulpas yra už 120 m nuo žmogaus. Kokiu kampu žmogus mato tą stulpą?**

**3. Kai regėjimo kampas lygus 1′, žmogus negali įžiūrėti kūnų. Iš kokio didžiausio aukščio lakūnas, skrisdamas virš futbolo aikštės, dar gali pamatyti 25 cm skersmens sviedinį?**

**4. Žmogus mato 10,5 m aukščio namą 9°30′ kampu. Kokiu atstumu nuo to namo jis stovi?**

**5. Kokiu atstumu nuo žmogaus turi būti 5 cm aukščio švytintis daiktas, kad žmogus jį matytų kaip švytintį tašką (regėjimo kampas mažesnis kaip 1′)?**

**6. Kada akies laužiamoji geba didesnė: kai žiūrime į artimus daiktus ar kai į tolimus? Kodėl?**

**7. Kaip turi naudotis mikroskopu žmonės, nešiojantys akinius: žiūrėti į okuliarą pro akinius ar be jų? Atsakymą pagrįskite.**

**8. 2 m aukščio daiktas yra 30 m atstumu nuo stebėtojo, kurio porinės akių sistemos židinio nuotolis 1,5 cm. Kokio dydžio to daikto atvaizdas susidarys akies tinklainėje?**

**9. Mokinys įprato skaityti knygą, laikydamas ją 20 cm atstumu nuo akių. Kokios laužiamosios gebos akinius privalo nešioti mokinys, kad galėtų skaityti knygą, laikydamas ją geriausio matymo nuotoliu?**

**10. Trumparegis žmogus nešioja – 4 D laužiamosios gebos akinius. Koks yra jo geriausio matymo nuotolis be akinių?**

**11. Toliaregis žmogus gali skaityti knygą, laikydamas ją ne mažesniu kaip 80 cm atstumu nuo akių. Kokios laužiamosios gebos akinius turi nešioti tas žmogus, kad nurodytas atstumas būtų lygus 25 cm?**

# 19 SKYRIUS. ŠVIESOS BANGOS

## 123. Šviesos interferencija

**Šviesõs interfereñcija – tai kohereñtinių bangų̃ sanklotos rezultatas.**

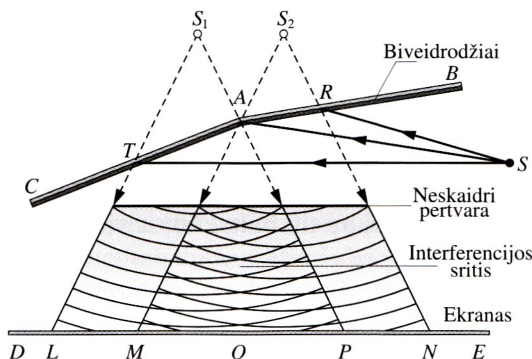
**Koherentinėmis bangomis vadiname vienodo bangos ilgio (monochromatines) ir dažnio bei pastovaus fazių skirtumo bangas.** Tokias bangas išspinduliuoja *koherentiniai šviesos šaltiniai.*

Kiekvieno šviesos šaltinio atskiri atomai spinduliuoja tam tikro bangos ilgio elektromagnetines bangas. Vieno atomo spinduliavimas trunka apie $10^{-8}$ s ir nutrūksta, kai jis išspinduliuoja visą energijos perteklių arba kai susiduria su gretimais atomais. Po to jis vėl gali spinduliuoti, tačiau naujai išspinduliuotų bangų fazė skirsis

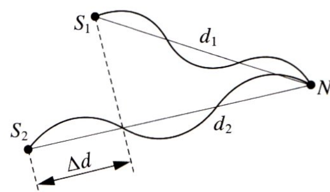
nuo anksčiau to paties atomo išspinduliuotų bangų fazės. To paties šviesos šaltinio atskirų atomų spinduliuojamų bangų fazių skirtumai visą laiką keičiasi (apytiksliai per $10^{-8}$ s). Kadangi kiekvienas šviesos šaltinis yra sudarytas iš labai daug atomų, tai dviejų skirtingų šaltinių spinduliuojamos šviesos bangos negali būti koherentinės.

Tačiau artimų sąveikaujančių atomų grupės išspinduliuojamos bangos, nors ir sklindančios skirtingais keliais, yra tarpusavyje susijusios; iš čia kilo ir jų pavadinimas – koherentinės (susijusios) bangos. A. Frenelis (1788–1827), panaudodamas atspindį, išsklaidė šviesos bangų pluoštą į du pluoštus. Tuo tikslu iš nedidelio paviršiaus šviesos šaltinio $S$ išspinduliuotų bangų pluoštą jis nukreipė į du plokščius veidrodžius $AB$ ir $AC$, kurie sudaro kampą, artimą $\pi$ radianų (302 pav.).

Spindulių $SR$ ir $ST$ kryptimis sklindančios bangos, atsispindėjusios nuo veidrodžių $AB$ ir $AC$, eina tartum iš dviejų šviesos šaltinio $S$ menamųjų atvaizdų $S_1$ ir $S_2$. Tokie du menamieji šviesos šaltiniai $S_1$ ir $S_2$ bei tariamai iš jų sklindančios šviesos bangos yra koherentiniai. Šių bangų pluoštai turi pastovų fazių ir bangų eigos skirtumą. Todėl ekrane $DE$ gaunamos šviesios ir tamsios juostos.




302 pav.




303 pav.

**Reiškinys, kuriam esant dvi sklindančios erdvėje koherentinės bangos susideda ir tam tikruose erdvės taškuose susidaro pastovios sustiprintos ir susilpnintos apšvietos juostos, vadinamas šviesos interferencija.**

Norint apskaičiuoti šviesiąsias ir tamsiąsias interferencijos juostas ekrane $DE$, vietoj šviesos spindulių $S_2N$ ir $S_1N$ bangų fazių skirtumo naudojamasi atstumų $S_2N$ ir $S_1N$ skirtumu, kuris žymimas $\Delta d$ ir vadinamas *bangõs eigõs skir̃tumu* (303 pav.): $\Delta d = d_2 - d_1$. Iš šios lygties matyti, kad **bangos eigos skirtumas lygus šviesos bangų optinių kelių skirtumui.**

Koherentinės bangos vienuose erdvės taškuose sustiprinamos, o kituose – susilpninamos. Tai priklauso nuo bangų optinės eigos skirtumo.

**Kai bangos eigos skirtumas yra lygus sveikam bangų ilgių ($\lambda$) arba lyginiam pusbangių $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ skaičiui, tai gaunamas interferencijos maksimumas**, o bangų stiprinimosi sąlyga užrašoma taip:

$$\Delta d = k\lambda; \tag{291}$$

čia $k = 0,1,2,...$

**Kai šviesos bangos eigos skirtumas lygus nelyginiam pusbangių $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ skaičiui, gaunamas interferencijos minimumas**, o jų silpninimosi sąlyga yra tokia:

$$\Delta d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}; \tag{292}$$

čia $k = 0,1,2,...$

Be veidrodžių, koherentinėms šviesos bangoms gauti A. Frenelis dar panaudojo *biprìzmę*, kurią sudaro dvi mažo laužiamojo kampo prizmės, sudėtos pagrindais (304 pav.), o kaip šviesos šaltinį – vienspalve šviesa apšviestą plyšį $S$, lygiagretų biprizmės bukojo kampo briaunai. Tada biprizmė sudaro du apšviesto plyšio $S$ menamuosius atvaizdus $S_1$ ir $S_2$. Iš jų sklindančios koherentinės bangos ekrano srityje $MN$ sudaro šviesius ir tamsius interferencinius ruožus, lygiagrečius su biprizmės briauna.

Jeigu tarp stiklinės plokštelės ir ant jos padėto plokščiai iškilo lęšio (kurio kreivumo spindulys didelis) yra plonas oro sluoksnis, tai susidaro interferencinis vaizdas – ant lęšio matomi koncentriniai apskritimai, vadinami *Niutono žiedais*.

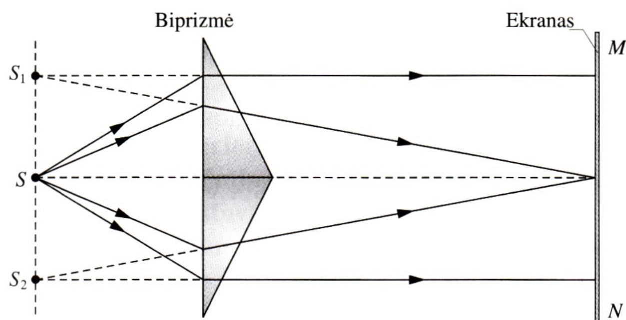
Plokščiai iškilą lęšį, kurio rutuliškojo paviršiaus kreivumas mažas, padėkime ant stiklinės plokštelės taip, kaip parodyta 305 paveiksle. Atidžiai stebėdami lęšio paviršių (geriau pro lupą), lęšio ir plokštelės sąlyčio vietoje pamatysime tamsią dėmę, o aplink ją – keletą apskritų vaivorykštinių žiedų. Atstumas tarp gretimų žiedų, einant nuo centro, mažėja (1 pav. (sp.), *a*)*. Tai ir yra Niutono žiedai. Niutonas juos stebėjo ir labai atidžiai ištyrė, apšvietęs lęšį ne tik balta, bet ir vienspalve (monochromatine) šviesa. Kiekvieną vaivorykštinį žiedą sudarančių spalvotų žiedų spinduliai didėja einant nuo violetinio spektro krašto iki raudono: raudonų žiedų spinduliai yra didžiausi (1 pav. (sp.), *b*).

Išsamiai paaiškinti, kodėl atsiranda žiedai, Niutonas negalėjo. Jungui pirmajam pavyko tai padaryti, kadangi jis rėmėsi prielaida, kad šviesa yra bangos.

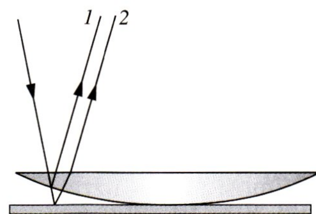
Dabar išnagrinėkime, kaip sklinda tam tikro ilgio šviesos banga, krintanti statmenai į plokščiai iškilą lęšį (305 pav.).

---

* Paveikslai, kurių numeriai turi nuorodą (sp.), yra spalvotoje įklijoje.




304 pav.

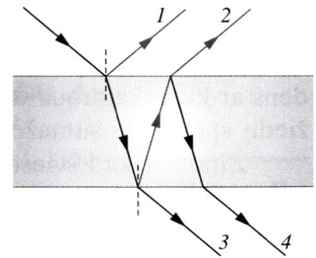



305 pav.

*1* banga – tai šviesa, atsispindėjusi nuo lęšio iškilo paviršiaus stiklo ir oro ribos, o *2* – nuo plokštelės oro ir stiklo ribos. Šios bangos yra koherentinės, nes jų šviesos bangos ilgiai vienodi ir fazių skirtumas pastovus. Fazių skirtumas susidaro todėl, kad *2* banga nueina ilgesnį kelią negu *1* banga. Jeigu antroji banga atsiliks nuo pirmosios bangos sveiku bangų ilgių skaičiumi, tai šios bangos sumuodamosi viena kitą sustiprins, nes jų virpesių fazės vienodos. O jeigu antroji banga atsiliks nuo pirmosios bangos nelyginiu pusbangių skaičiumi, tai jų virpesių fazės bus priešingos, ir bangos viena kitą slopins.

Žinodami lęšio kreivumo spindulį $R$, galime apskaičiuoti, kokiu atstumu nuo lęšio ir plokštelės sąlyčio taško bangos, kurių ilgis $\lambda$, slopins viena kitą, taigi sužinoti ir tų bangų eigos skirtumą. Šie atstumai lygūs tamsių Niutono žiedų spinduliams. Juk oro sluoksnio vienodo storio juostos yra apskritos. Išmatavus žiedų spindulius, galima apskaičiuoti bangų ilgius.

Šviesos interferencijos reiškiniu nesunku paaiškinti balta šviesa apšviestų vabzdžių sparnų, muilo burbulų, riebalų bei tepalų plėvelių, susidariusių vandens paviršiuje, spalvas, – nors šiaip jie yra bespalviai. Kadangi bet kuri plėvelė yra tam tikro storio, tai dalis šviesos bangos atsispindi nuo plėvelės viršutinio paviršiaus, o kita šviesos dalis, perėjusi plėvelę, atsispindi nuo kito jos paviršiaus. Dalis šviesos kiaurai pereina plėvelę (306 pav.).



306 pav.

Abi nuo plėvelės atsispindėjusios bangos (*1* ir *2*) bei plėvelę perėjusios bangos (*3* ir *4*) yra koherentinės ir tarpusavyje interferuoja. Interferencijos rezultatas priklauso nuo plėvelės storio ir spindulių kritimo kampo. Todėl skirtingų ilgių bangų interferencijos sąlygos tenkinamos skirtingose vietose, ir plėvelė atrodo spalvota.

Lygiagrečių paviršių plėvelė (gali būti ir stiklo plokštelė), apšviesta monochromatine lygiagrečių spindulių šviesa, atrodys arba tolygiai apšviesta, arba tamsi (priklausomai nuo to, kuri sąlyga bus tenkinama), nes čia vyksta **šviesos bangų interferencija – tokia dviejų bangų sudėtis, kai atstojamasis šviesos intensyvumas įvairiuose erdvės taškuose yra nevienodas.** Interferencijos rezultatas (intensyvumo sustiprėjimas ar susilpnėjimas) priklauso nuo šviesos kritimo į plėvelę kampo, plėvelės storio ir bangos ilgio. Šviesa sustiprėja tada, kai lūžusi (*2*) banga nuo atsispindėjusios (*1*) bangos atsilieka sveiku bangų ilgių skaičiumi (arba lyginiu pusbangių skaičiumi). Jeigu antroji banga atsilieka nuo pirmosios pusbangiu arba nelyginiu pusbangių skaičiumi, tai šviesa susilpnėja.

**Atsispindėjusios nuo išorinio bei vidinio plėvelės paviršiaus bangos yra koherentinės, nes jos – to paties šviesos pluošto dalys. Kiekvieno atomo išspinduliuotas bangų pūpsnis plėvelėje išsiskiria į dvi dalis, kurios po to susitinka ir interferuoja.**

T. Jungas taip pat suvokė, kad spalvos priklauso nuo šviesos bangų ilgio (arba dažnio). Skirtingų spalvų šviesos srautus atitinka skirtingo ilgio bangos. Skirtingo ilgio bangas stiprina nevienodo storio plėvelė (kritimo kampai yra lygūs). Vadinasi, tokią plėvelę apšvietus balta šviesa, joje susidaro spalvos, kitaip tariant, plėvelė tarsi nusispalvina.

Matavimai rodo, kad raudonos šviesos bangos ilgis $\lambda_r = 8 \cdot 10^{-7}$ m, o violetinės $\lambda_v = 4 \times 10^{-7}$ m. Kitų spektro spalvų šviesos bangų ilgių vertės yra tarpinės. Bet kurios spalvos šviesos bangos ilgis yra labai mažas. Įsivaizduokime keleto metrų ilgio jūros bangą, kuri tiek padidėja, kad tęsiasi per visą Atlanto vandenyną nuo Amerikos iki Europos krantų. Tiek pat kartų padidintas šviesos bangos ilgis būtų vos didesnis už vidutinio formato knygos lapo plotį.

Taigi, tirdami interferenciją, ne tik sužinojome, kad šviesa yra bangos, bet ir išmokome išmatuoti tos bangos ilgį. Be to, išsiaiškinome, kad **šviesos spalva priklauso nuo bangos ilgio arba virpesių dažnio**, kaip ir garso aukštis, nuo jo dažnio.

Iš tikrųjų gamtoje jokių spalvų nėra, o egzistuoja tiktai įvairaus ilgio elektromagnetinės bangos. Kadangi žmogaus akis yra sudėtingas optinis prietaisas, sugebantis pastebėti nedidelį šviesos bangos ilgių skirtumą (apie $10^{-6}$ cm), tai mes matome spalvas. Tuo tarpu dauguma gyvūnų spalvų neskiria – jie visada mato juodai baltą vaizdą.

Eksperimentą bandykime pakartoti, tarpą tarp plokštelės ir lęšio pripildę vandens ar kito skaidraus skysčio, kurio lūžio rodiklis $n$. Matysime, kad interferencinių žiedų spinduliai sumažės. Kodėl taip atsitiko?

Žinoma, kad šviesos greitis, pereinant iš tuštumos į kitą aplinką, sumažėja $n$ kartų. Kadangi $v = \lambda f$, tai $n$ kartų turi sumažėti šviesos dažnis arba bangos ilgis. Mes jau išsiaiškinome, kad žiedų spinduliai priklauso nuo bangos ilgio, todėl $n$ kartų sumažėja į aplinką patenkančios šviesos bangos ilgis, o ne jos dažnis. Galime daryti išvadą, kad, **šviesai pereinant iš vienos aplinkos į kitą, pakinta bangos ilgis, o ne dažnis**.

Interferencija vyksta ir tada, kai šviesa atsispindi nuo dviejų paviršių, tarp kurių yra plonas oro sluoksnis. Apšvieskime vienspalviais statmenais spinduliais dvi suglaustas stiklines plokšteles, tarp kurių viename krašte įsprausta adata arba dar mažesnio storio atramėlė. Pamatysime, kad dėl susidariusio pleišto formos oro tarpo atsiras interferencinės juostos, lygiagrečios su plokštelių lietimosi briauna. Šios tamsios ir šviesios linijos išsidėstys vienodais atstumais. Išmatavę atstumą $a$ tarp juostų, galime apskaičiuoti adatos, plauko arba kito įsprausto daikto storį $h$:

$$h = \frac{\lambda l}{2na}; \tag{293}$$

čia $l$ – pleišto pagrindo ilgis, $n$ – stiklo lūžio rodiklis, $\lambda$ – šviesos bangos ilgis, $a$ – atstumas tarp juostų.

Kai oro tarpelis tarp stiklo paviršių yra nevienodo storio, susidaro ne lygiagrečios, o išsikreivinusios interferencinės linijos. Todėl, uždėjus ant tiriamojo paviršiaus labai lygią stiklo plokštelę, pagal interferencines linijas galima nustatyti to paviršiaus nelygumus.

Interferencijos reiškinys yra pritaikytas ypatingo tikslumo optiniams matavimo prietaisams – *interferomètrams* sukurti. Paviršiaus nelygumai interferometrais išmatuojami net $2{,}5 \cdot 10^{-8}$ m tikslumu, o kampai – $10^{-6}$ rad tikslumu. Interferenciniais metodais tikrinama paviršių šlifavimo kokybė, matuojami pailgėjimo koeficientai, itin plonų gijų storiai ir kt.

## Klausimai ir užduotys

**1. Kaip gaunamos koherentinės šviesos bangos?**

**2. Kokia šviesos interferencijos esmė?**

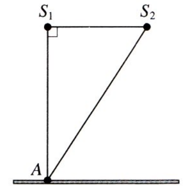
**3. Su kuria fizikine šviesos bangos charakteristika susijusi jos spalva?**

**4. Vanduo apšviestas raudona šviesa. Kokią spalvą mato žmogus, esantis po vandeniu?**

**5. Stebint muilo plėvelę, susidariusią ant plokščio vertikalaus rėmelio, galima pamatyti, kaip interferencinės juostos laikui bėgant slenka žemyn, o po kurio laiko viršutinė plėvelės dalis pajuoduoja ir plėvelė plyšta. Kodėl?**

**6. Vieną erdvės tašką pasiekia koherentiniai spinduliai, kurių bangos ilgis 600 nm, o eigos skirtumas 1,2 μm. Ką matysime toje vietoje spinduliams interferuojant: a) ore; b) vandenyje; c) stikle, kurio lūžio rodiklis 1,5?**

**7. Du koherentiniai šviesos šaltiniai $S_1$ ir $S_2$, spinduliuojantys 0,5 μm ilgio bangas, nutolę vienas nuo kito 2 mm atstumu. Atstumas nuo šaltinio $S_1$ iki ekrano lygus 2 m. Koks bus ekrano taškas $A$ – apšviestas ar tamsus?**




**8. Tam tikru būdu gauti du vienspalviai šviesos šaltiniai, skleidžiantys 560 nm ilgio bangas. Atstumas nuo tų šaltinių iki ekrano lygus 3,2 m. Per ekrano tašką $C$, esantį 28 mm atstumu nuo centro $O$, eina trečioji tamsi juosta (skaičiuojant nuo centrinės tamsios juostos, einančios per centrą $O$). Kokiu atstumu šviesos šaltiniai nutolę vienas nuo kito?**

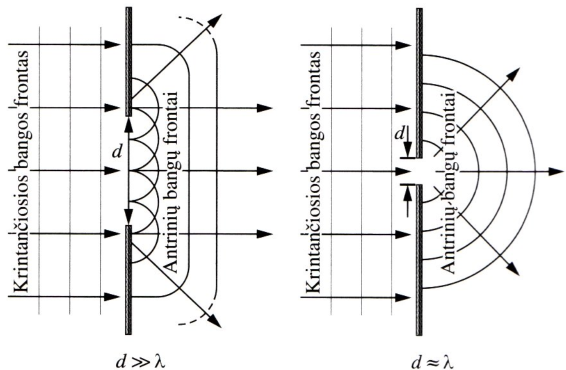
# 124. Šviesos difrakcija. Difrakcinė gardelė

**Difrãkcija – tai reiškinys, kuriam esant šviesos bangos, einančios pro kliūčių kraštą, užlinksta.** Difrakcija stebima tais atvejais, kai kliūties tiesiniai matmenys daug mažesni arba lygūs krintančiosios šviesos bangos ilgiui arba kai tenkinama sąlyga:

$$\lambda \approx \frac{d^2}{4l}; \qquad (294)$$

čia $d$ – kliūties matmuo, $\lambda$ – šviesos bangos ilgis, $l$ – atstumas už kliūties.

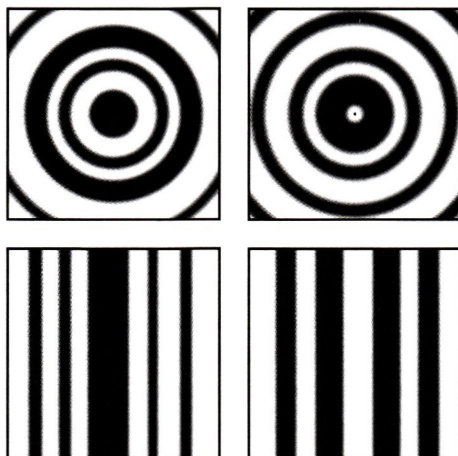
307 paveiksle parodytas plokščiosios bangos sklidimas pro didelę ir pro mažą angą. Maža anga yra tarsi taškinis šviesos šaltinis, nuo kurio šviesos bangos pasidaro sferinės ir sklinda į visas puses. 308 paveiksle parodyta, koks difrakcinis vaizdas gaunamas, kai šviesa užlinksta pereidama skylutę, neskaidrų diską, vielutę ir siaurą plyšį.




307 pav.

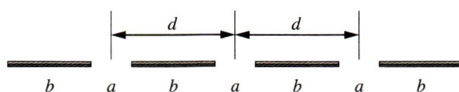
Apšvietus kliūtį natūralia šviesa, gaunamas difrakcinis, nuspalvintas vaivorykštės spalvomis, vaizdas. Arčiau jo centro yra violetinė, toliau mėlyna ir kitos spalvos.

Difrakcinio vaizdo susidarymas paaiškinamas tuo, kad, krintant šviesai, kiekvienas kliūties (angos) taškas tampa antrinių bangų šaltiniu, skleidžiančiu koherentinius spindulius, nes jų fazių ir bangos eigos skirtumai yra pastovūs. Taigi antrinės bangos, būdamos koherentinės, interferuoja ir mes matome vaizdus, vienaip ar kitaip analogiškus pavaizduotiems 308 paveiksle.



308 pav.

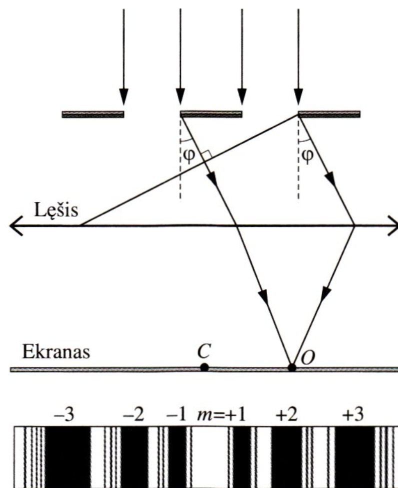
Kai šviesa praeina pro medžiagą, kurioje yra daug angų, gaunamas ganėtinai ryškus difrakcinis vaizdas. Be to, kuo mažesni atstumai tarp angų, tuo ryškesnės ir retesnės interferencijos juostelės ekrane, tuo difrakcija yra geresnė.




309 pav.

Kokybiškam difrakciniam vaizdui gauti gaminamos specialios *difrákcinės gardẽlės, sudarytos iš neskaidrios medžiagos, kurioje yra daug siaurų lygiagrečių angų* (309 pav.).

**Atstumas tarp gretimų angų centrų vadinamas gardẽlės konstánta *d*.** Gardelė gaminama specialia mašina, kuri įbrėžia stiklo plokštelės ilgio milimetre tūkstantį ir daugiau lygiagrečių brūkšnelių. Kaip jau buvo minėta, kiekvienas tokios gardelės plyšys, kurį pasiekia ir sutrikdo atsklidusi banga, yra antrinių koherentinių bangų šaltinis.



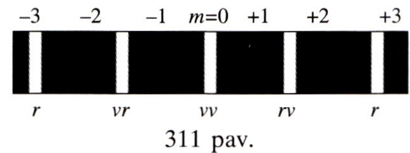

310 pav.

Jeigu gardelė, už kurios pastatytas glaudžiamasis lęšis, apšviečiama statmenai lygiagrečių spindulių pluoštu, tai lęšio židinio plokštumoje esančiame ekrane susidaro antrinių bangų interferencinis vaizdas (310 pav.). Prieš gardelės centrą ($C$) visada yra šviesi juostelė – *centrìnis mãksimumas*. Abipus jo vienodais atstumais išsidėsto pirmos, antros ir aukštesnių eilių maksimumai. Jie gaunami tose ekrano vietose, į kurias lęšis surenka kampu užlinkusius spindulius. Tų spindulių bangos eigos skirtumas turi būti lygus sveikam bangų ilgių skaičiui:

$$d \cdot \sin \varphi = k\lambda; \qquad (295)$$

čia $k = 0,1,2,...$

Apšvietus gardelę natūralia (balta) šviesa, ekrane gaunamas jos spektras: abipus centrinio baltos šviesos maksimumo išsidėsto kiti maksimumai bangos ilgėjimo tvarka. Kuo aukštesnė spektro eilė $k$, tuo platesnis spektras (311 pav.).



311 pav.

Todėl, apšvietę gardelę balta šviesa, matysime iš karto visų septynių vaivorykštės spalvų linijas – *difrãkcijos spèktrą* (2 pav. (sp.)). Vadinasi, šviesos difrakcija įrodo, kad natūrali (balta) šviesa yra sudėtinė, sudaryta iš septynių pagrindinių spalvų.

Difrakcinės gardelės metodu gana tiksliai galima nustatyti šviesos bangos ilgį arba dalelių išsidėstymą kristaluose (žr. 14 lentelę).

14 lentelė

**Pagrindinės spalvų ir garsų charakteristikos**

| Spalvų charakteristikos | | | Garsų charakteristikos | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Spalva** | **Bangos ilgis, nm** | **Virpesių dažnis, Hz** | **Tonas** | **Bangos ilgis, m** | **Virpesių dažnis, THz** |
| Raudona | 760–620 | 400–480 | Do | 1,27 | 261,63 |
| Oranžinė | 620–590 | 480–510 | Re | 1,13 | 293,66 |
| Geltona | 590–560 | 510–540 | Mi | 1,01 | 329,63 |
| Žalia | 560–500 | 540–600 | Fa | 0,95 | 349,23 |
| Žydra | 500–480 | 600–620 | Sol | 0,85 | 392,00 |
| Mėlyna | 480–450 | 620–670 | La | 0,76 | 440,00 |
| Violetinė | 450–380 | 670–800 | Si | 0,67 | 493,88 |

Kartais apie Saulę, Mėnulį, gatvės žibintus ar apie žvakės liepsną matome spektro spalvų apskritimus. Tai – difrakcijos reiškinys, stebimas sklindant šviesai pro rūką, plonus debesis arba ledo kristaliukų sluoksnį.

Šviesos difrakciją galima stebėti ir atsispindint jai nuo atspindžio gardelės – tankaus tinklo šviesą atspindinčių ir išsklaidančių ruoželių. Pavyzdžiui, pavartę prieš lemputės šviesą patefono plokštelę ar kompaktinį diską, pamatysime spektrą, susidariusį šviesai atsispindint nuo griovelių ir lygių ruoželių. Kristalinėje gardelėje taisyklingai išsidėsčiusios dalelės sudaro natūralią difrakcijos gardelę. Todėl, šviesai sklindant pro kristalą, gaunami difrakciniai vaizdai, iš kurių nustatoma kristalinės gardelės struktūra bei atstumai tarp jos mazgų.

## Klausimai ir užduotys

**1. Ką vadiname šviesos difrakcija? Kokiomis sąlygomis ją galime stebėti?**

**2. Uždaroje kameroje su maža skylute galima gauti daikto atvaizdą. Mažinant skylutės matmenis, atvaizdas iš pradžių darosi vis ryškesnis, o paskui blanksta. Kodėl?**

**3. Kokiu kampu užlinkę spinduliai sudaro antros eilės spektrą, kai gardelė, kurios viename milimetre yra 5 brūkšneliai, apšviečiama natrio šviesa (bangos ilgis 589 nm)?**

**4. Kaip toli nuo difrakcinės gardelės reikia pastatyti ekraną, kad atstumas tarp nenukrypusių spindulių sudaromo atvaizdo ir ketvirtosios eilės spektro būtų lygus 50 nm, kai šviesos bangos ilgis 500 nm? Difrakcinės gardelės konstanta 0,02 mm.**

**5. Atstumas tarp patefono plokštelės griovelių lygus 1/40 mm, o difrakciniai spektrai matomi 2° kampu. Apskaičiuokite raudonos šviesos bangos ilgį.**

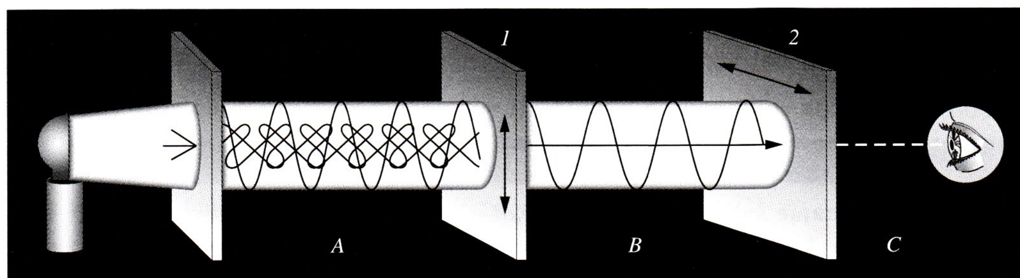
**6. Difrakcinė gardelė, kurios konstanta 0,004 mm, apšviečiama 687 nm bangos ilgio šviesa. Kokiu kampu reikia žiūrėti į gardelę, norint pamatyti antros eilės spektrą?**

**7. Kaip kis difrakcinio spektro vaizdas, tolinant ekraną nuo difrakcinės gardelės? Atsakymą pagrįsite.**

## 125. Šviesos poliarizacija

Aiškindami šviesos prigimtį, padarėme išvadą, kad šviesa – tai skersinės elektromagnetinės bangos, kurių elektrinis ir magnetinis laukai kinta ganėtinai dideliu dažniu ir statmenai bangos sklidimo krypčiai. Kadangi mūsų akis reaguoja tik į elektrinio lauko virpesius, tai apie juos toliau ir kalbėsime. Natūraliosios šviesos šie virpesiai vyksta visomis statmenomis šviesos spindulio sklidimo kryptimis (312 pav., *A*). Ši simetrija kartais sutrinka. Pavyzdžiui, krintant šviesos spinduliui į vandenį 52° kampu arba į veidrodį 55° kampu, atsispindėjęs ir lūžęs spinduliai būna statmeni vienas kitam. Ir tada virpesių kryptys tarsi pasidalija: atsispindėjusiame spindulyje lieka tik vienos krypties virpesiai, lūžusiame – taip pat vienos, pirmiesiems statmenos krypties virpesiai. Analogiškas reiškinys įvyksta ir šviesai pereinant Islandijos špato arba turmalino kristalo plokštelę (312 pav.). **Šviesa, kurios elektrinio lauko virpesiai vyksta vienoje plokštumoje** (312 pav., *B*), **vadinama poliarizúotąja (tiksliau sakant, plokščiai poliarizuotąja) šviesa. Poliarizuotosios šviesos išskyrimas iš natūralios šviesos vadinamas šviesõs poliarizãcija.**

Poliarizuotosios šviesos, praėjusios minėtą skaidrią kristalinę plokštelę, virpesių kryptis priklausys nuo to, kaip toji plokštelė išpjauta iš kristalo, t. y. kokia kryptimi šviesa turi skverbtis pro kristalinę gardelę. Padėkime poliarizuotosios šviesos kelyje antrą tokią plokštelę (*2*) (312 pav.). Jei šių plokštelių kristalinės gardelės bus orientuotos vienodai, šviesa pereis ir antrąją plokštelę. Sukant antrąją plokštelę




312 pav.

toje pačioje plokštumoje, šviesa silpnės ir, kai vienodo dalelių išsidėstymo plokštumos abiejose plokštelėse bus statmenos, šviesa visai išnyks (312 pav., *C*).

Šviesą poliarizuoja ne vien Islandijos špato ir turmalino kristalai, bet ir daugelis kitų medžiagų. Labai stipria poliarizacija pasižymi herapatito kristalai. 0,1 mm storio herapatito sluoksniu padengta plona lanksti celiuloido plėvelė visiškai poliarizuoja praeinančią šviesą. Tokia optinė sistema vadinama *poliaroidù* arba *poliarizãciniu šviesõs fìltru*. Poliaroidiniai akiniai saugo nuo saulės akinimo, pro juos žiūrimi stereofilmai ir stereoskopinės (erdvinės) fotografijos. Padengus automobilių priekinius stiklus ir žibintus poliaroido plėvelėmis, vairuotojų neakina priešais važiuojančių mašinų šviesa, o įvairūs poliarizaciniai prietaisai plačiai naudojami technikoje ir moksliniuose tyrimuose.

### Klausimai ir užduotys

**1. Kuo skiriasi natūralioji ir poliarizuotoji šviesa?**

**2. Nematydami nutolusių miške draugų, imame juos šaukti. Kodėl medžiai užstoja šviesą, bet neužstoja garso?**

**3. Visiškosios poliarizacijos kampu vadinamas toks kampas, kuriuo krintantis į aplinkų ribą šviesos spindulys atsispindi visiškai poliarizuotas. Apskaičiuokite visiškosios poliarizacijos kampą, spinduliui krintant iš oro į vandenį.**

## 126. Šviesos dispersija

Visų ilgių elektromagnetinės bangos, taigi ir šviesos bangos sklinda vakuume vienodu greičiu ($c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s). Vadinasi, kiekvieną elektromagnetinių virpesių dažnį $f$ vakuume atitinka tam tikras bangos ilgis $\lambda$, apskaičiuojamas pagal formulę

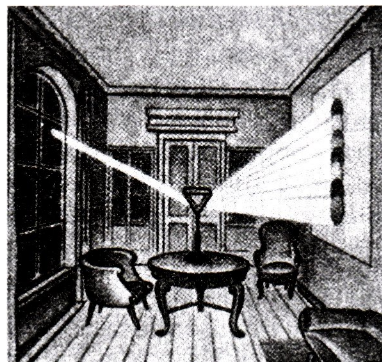
$$\lambda = \frac{c}{f}. \qquad (296)$$

**Elektromagnetinė banga, kurios elektrinio ir magnetinio lauko virpesiai yra vienodo pastovaus dažnio *f*, vadinama vienspalve (monochromatine) banga.** Jeigu vienspalvė banga sklinda medžiagine aplinka, tai jos elektrinis laukas priverčia virpėti tos aplinkos daleles tuo pačiu dažniu $f$. Tokie virpantys krūviai sukelia antrines elektromagnetines bangas, kurių dažnis toks pat, kaip ir pirminių bangų. Atstojamosios elektromagnetinės bangos, kuri susidaro medžiagoje (susidedant pirminei ir antrinei bangoms), dažnis išlieka toks pat, kaip ir dedamųjų bangų, bet pasikeičia jos amplitudė, fazė ir sklidimo greitis. Šviesos sklidimo medžiagoje greitis $v$ priklauso nuo elektromagnetinių virpesių dažnio: mažesnio dažnio bangos sklinda didesniu greičiu. Pavyzdžiui, raudona šviesa paprastu stiklu sklinda greičiau negu violetinė, nes raudonos šviesos bangų dažnis yra mažesnis (o jų bangų ilgis $\lambda$ – didesnis). Todėl ir medžiagos absoliutusis lūžio rodiklis $\left(n = \frac{c}{v}\right)$ taip pat priklauso nuo šviesos bangos dažnio (arba bangos ilgio).

Vakuume skirtingo dažnio šviesos bangos sklinda drauge tuo pačiu greičiu $c$. Patekusios į kurią nors medžiaginę aplinką, jos pradeda sklisti skirtingais greičiais, todėl skirtingai lūžta ir sklinda skirtingomis kryptimis.

**Lūžio rodiklio priklausomybė nuo krintančios į dviejų aplinkų ribą šviesos dažnio (bangos ilgio) vadinama šviesõs dispèrsija** (lot. *dispersio* – išskaidymas, išbarstymas).

1672 m. I. Niutonas pirmasis pastebėjo šviesos dispersijos reiškinį, į prizmę nukreipęs siaurą spindulių pluoštą, kuris patekdavo į aptemdytą kambarį pro mažą langinės angelę. Pasiekęs stiklinę prizmę, jis lūždavo ir priešingoje sienoje susidarydavo ištęstos vaivorykštės spalvų atvaizdas (313 pav.). Niutonas išskyrė septynias tuo metu jau žinomas sudėtines natūralios šviesos spalvas: violetinę, mėlyną, žydrą, žalią, geltoną, oranžinę ir raudoną, o pačią vaivorykštinę juostelę pavadino *spektrù* (3 pav. (sp.)).

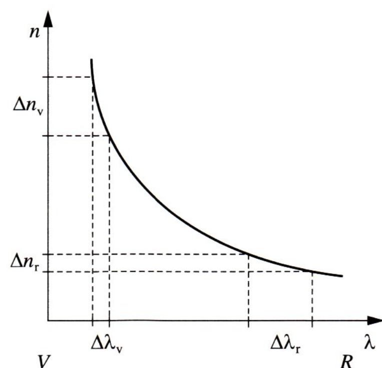


313 pav.

Angą uždengęs raudonu stiklu, Niutonas ant sienos matė tiktai raudoną dėmę, uždengęs mėlynu – mėlyną, ir t. t. Vadinasi, ne prizmė nudažo baltą spindulį, kaip buvo manoma anksčiau. Prizmė nepakeičia šviesos, bet tiktai išskaido ją į sudedamąsias dalis. Balto spindulio struktūra sudėtinga. Jį galima suskaidyti į įvairių spalvų spindulius, kurių bendras poveikis sukuria baltos šviesos įspūdį. Iš tikrųjų, jeigu antrąja prizme, pasukta 180° pirmosios atžvilgiu, surinktume visus spektro spindulius, tai gautume baltą šviesą. Išskirti iš spektro kurie nors spinduliai, pavyzdžiui, žali, praėję dar pro vieną prizmę, spalvos nekeičia.

Labiausiai nukrypsta nuo pradinės spindulio krypties (t. y. daugiausia lūžta) violetiniai spinduliai, kurių sklidimo greitis stikle yra mažiausias, mažiausiai – raudoni spinduliai (jų sklidimo greitis stikle yra didžiausias). Šią išvadą Niutonas suformulavo traktate „Optika“: „Skirtingų spalvų spinduliai skiriasi lūžimo laipsniu“ (skirtingi jų lūžio stikle rodikliai).

Sugretinus spektrus, gautus skirtingų medžiagų prizmėmis, buvo nustatyta, kad šių spektrų kurios nors dalies plotis, atitinkantis tą patį dažnių intervalą $(f_1 - f_2)$, būna skirtingas. Tai rodo, kad medžiagos skiriasi ne tik lūžio rodikliu, bet ir dispersinėmis savybėmis. Apie jas spendžiama iš grafiko, vaizduojančio lūžio rodiklio $n$ priklausomybę nuo šviesos bangos ilgio vakuume. 314 paveiksle parodyta paprasto stiklo dispersijos kreivė regimojoje spektro dalyje. Dispersijos matas yra lūžio rodiklio pokytis $\Delta n$ tam tikrame bangų ilgių intervale $\Delta\lambda$. Santykis $\frac{\Delta n}{\Delta\lambda}$ įvairiose spektro dalyse taip pat yra skirtingas. Iš dispersinės kreivės matyti, kad stiklo $\frac{\Delta n}{\Delta\lambda}$ violetinėje spektro dalyje yra didesnis negu raudonojoje, todėl toks pat bangų ilgių intervalas $\Delta\lambda$ prizme gauto spektro violetinėje ir mėlynojoje srityse užima didesnį plotį negu raudonojoje. Taigi prizme gautame spektre spalvos pasiskirsto netolygiai, ir tai priklauso nuo prizmės stiklo rūšies.




314 pav.

Išnagrinėtoji **dispersija vadinama normaliája, kai, bangos ilgiui didėjant, lūžio rodiklis mažėja**. Tačiau taip lūžta tik tos bangos, kurių nesugeria medžiaga. Sugeriamų bangų ilgių srities dispersijos kreivės eiga yra kitokia.

Iš to, kas jau buvo aptarta, galima suformuluoti dar vieną šio reiškinio apibrėžimą: **baltos šviesos skaidymasis į spektrą vadinamas šviesos dispersija**.

Remdamasis eksperimento rezultatais, Niutonas pareiškė, kad **„balta" šviesa yra sudėtinė, sudaryta iš spektro spalvų. Prizmė ne nuspalvina, o išskaido šviesą į jos sudėtines dalis. Vienos spektro dalies spinduliai daugiau nesiskaido – jie yra vienalyčiai.**

Įvairių spalvų spinduliai skiriasi ne tik sukeliamu regėjimo pojūčiu, bet ir fizikinėmis charakteristikomis: **kiekvienos spektro spalvos spinduliams būdinga kitokia lūžio rodiklio vertė**.

Žinant natūralios šviesos sudėtį, galima paaiškinti, kodėl kūnai yra spalvoti. **Baltas atrodo tas kūnas, kuris atspindi visų spektro spalvų spindulius. Daiktai, sugeriantys visų spalvų spindulius, atrodo juodi.** Kūnai, kurie vienokius spindulius sugeria, o kitokius atspindi, yra spalvoti. **Atspindėtoje šviesoje kūnai yra tos spalvos, kurios spindulius atspindi jų paviršius.** Kūnai dažniausiai atspindi kelių spalvų spindulius. Skirtingu santykiu susimaišę spinduliai sudaro tą spalvų įvairovę, kurią matome gamtoje.

**Apšviesti skaidrūs kūnai tampa tokios spalvos, kurios spindulius jie praleidžia.** Šviesoforo stiklas atrodo žalias todėl, kad jis yra skaidrus žaliai šviesai, o kitokius spindulius sugeria. Raudona šviesa apšviestas žalias stiklas atrodys juodas.

Lygiagrečių spindulių pluoštą nukreipkime pro angą ekrane į stiklinį rutuliuką arba nedidelę apvalią kolbą su vandeniu. Matysime, kad spinduliai rutuliuke lūžta ir atsispindi nuo jo vidinio paviršiaus. Iš rutuliuko spinduliai išeina spalvotu kūgio pavidalo pluoštu ir apšviečia ekraną. Išorinis kūgio paviršius esti raudonos, vidinis – violetinės spalvos, o tarp jų – visos kitos vaivorykštės spalvos. Nubraižę ekrane horizonto liniją, gauname vaizdžią vaivorykštės imitaciją.

Gamtoje šviesą skaidančių rutuliukų vaidmenį atlieka ore pakibę vandens lašeliai. Vaivorykštė matoma tada, kai stebėtojas, nusisukęs nuo saulės, žiūri į vandens lašelių pilną orą. Kiekvienas stebėtojas mato „savo" vaivorykštę, sudarytą „savo" lašelių. Tie lašeliai, kurie, žiūrint iš stebėtojo taško, kybo 41° kampu virš horizonto, siunčia stebėtojui violetinę šviesą, o tie, kurie kybo 43° kampu, – raudoną šviesą.

## Klausimai ir užduotys

**1. Ką vadiname šviesos dispersija?**

**2. Vanduo apšviestas raudona šviesa. Kokią spalvą mato žmogus, atsimerkęs po vandeniu?**

**3. Kodėl draudžiamiesiems eismo ženklams pasirinkta raudona spalva?**

**4. Paaiškinkite šių daiktų – stiklo, popieriaus, dangaus – mėlynos spalvos kilmę.**

**5. Ar išsiskaidys erdvėje baltas spindulys, krintantis iš oro į stiklinę plokštelę: a) įstrižai; b) statmenai? Kodėl?**

# 20 SKYRIUS. SPINDULIAVIMAS IR SPEKTRAI

## 127. Šiluminis spinduliavimas

**Įvairaus ilgio elektromagnetinių bangų spinduliavimas yra susijęs su kūnus sudarančių elektringųjų dalelių (elektronų, jonų) virpėjimu bei staigiu jų greičio kitimu. Kūnai spinduliuodami netenka vidinės energijos, todėl jų spinduliavimo pobūdis keičiasi.** Kad kūnai nuolat spinduliuotų, šie vidinės energijos nuostoliai turi būti nuolat papildomi. Pagal tai, kokiu būdu papildoma spinduliuojančio kūno energija, skiriamos įvairios spinduliavimo rūšys. Pavyzdžiui, pūvantis medis arba besioksiduojantis ore fosforas spinduliuoja šviesą vykstant cheminiams procesams, o tekant srovei pro praretintas dujas, molekulės spinduliuoja elektrinio lauko energijos sąskaita ir pan. Plačiausiai paplitęs **júodojo kū̃no spinduliavimas, kuris vyksta suteikto šilumos kiekio sąskaita: dėl šiluminio judėjimo susižadinę medžiagos atomai ar molekulės spinduliuoja elektromagnetines bangas – infraraudonúosius, regimúosius ir ultraviolètinius spiñdulius.**

Temperatūra – pagrindinis fizikinis dydis, nuo kurio priklauso kūno šiluminė būsena. Todėl, keičiantis temperatūrai, keičiasi ir spinduliavimo pobūdis. Pavyzdžiui, žemos temperatūros geležis ($T$ < 800 K) spinduliuoja tik infraraudonuosius spindulius, aukštesnės temperatūros – regimąją šviesą, dar aukštesnės temperatūros – ir ultravioletinius spindulius. Be to, spinduliavimo pobūdis priklauso ir nuo kūno cheminės sudėties – įvairūs kūnai, būdami tos pačios temperatūros, skleidžia skirtingus spindulius. Pavyzdžiui, įkaitinta geležis, kurios temperatūra yra didesnė negu 800 K, spinduliuoja raudonąją šviesą, tuo tarpu skaidrus kvarcas šioje temperatūroje skleidžia nematomus infraraudonuosius spindulius.

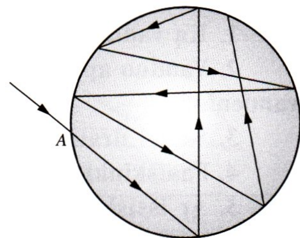
Kūnų šiluminis spinduliavimas (energiniu požiūriu) apibūdinamas tam tikrais fizikiniais dydžiais. Vienas jų – tai *spinduliãvimo srañtas*, arba *spinduliãvimo gebà*. **Spinduliavimo srautu (geba) $\Phi_e$ vadiname energiją, kurią kūnas išspinduliuoja per laiko vienetą visų ilgių elektromagnetinėmis bangomis.** Energijos srautas tarptautinėje SI vienetų sistemoje matuojamas galios vienetais: $[\Phi_e]$ = J/s = W.

**Srautas, kurį tolygiai spinduliuoja kūno paviršiaus ploto vienetas, esant $T$ temperatūrai, vadinamas enèrginiu šviesiù $R_T$ (arba spinduliãvimo intensyvumù):**

$$R_T = \frac{\Delta\Phi_e}{\Delta S}; \qquad (297)$$

čia $\Delta\Phi$ – energijos srautas, spinduliuojamas visų ilgių bangomis iš paviršiaus ploto elemento $\Delta S$. Energinio šviesio matavimo vienetas: $[R_T]$ = W/m².

**Kūnas, kuris sugeria bet kurioje temperatūroje visą į jį kritusią bet kokio bangos ilgio spindulių energiją, vadinamas absoliučiaĩ juodù kū̃nu.** Idealių absoliučiai juodų kūnų gamtoje nėra: suodžių sugerties pajėgumas yra maždaug 0,98, nes jie silpnai sugeria infraraudonuosius spindulius. Absoliučiai juodu kūnu galima laikyti



315 pav.

mažą tuščiavidurio rutulio angelę *A* (315 pav.). Pro ją įžambiai patekęs spindulys daug kartų atsispindi rutulio viduje, neišeidamas į aplinką (beveik visiškai sugeriamas).

Šiuo principu gaminamos krosnelės absoliučiai juodo kūno spinduliavimo dėsniams tirti.

### Klausimai ir užduotys

**1. Kokia yra šiluminio spinduliavimo esmė?**

**2. Kas lemia spinduliavimo pobūdį? Atsakymą pagrįskite.**

**3. Ką vadiname spinduliavimo srautu? Koks jo matavimo vienetas?**

**4. Ką vadiname spinduliavimo intensyvumu? Koks jo matavimo vienetas?**

**5. Krosnyje palaikoma 800 °C temperatūra atidarius dureles, kurių matmenys 22 cm × 15 cm. Kiek energijos kambarys gauna kas sekundę iš krosnies pro atviras dureles?**

**6. Elektros lempos siūlas įkaitęs iki 2000 °C. Kokį bangos ilgį atitinka didžiausia energija tos lempos emisijos spektre? Kurioje spektro dalyje yra tas bangos ilgis?**

**7. Didžiausia energija Saulės spektre atitinka 550 nm bangos ilgį. Kokia yra Saulės paviršiaus temperatūra?**

**8. Žvaigždės paviršiaus temperatūra lygi 30 000 K. Kokį bangos ilgį atitinka didžiausia energija tos bangos spektre? Kokia yra tos žvaigždės spinduliavimo geba?**

**9. Kokį bangos ilgį atitinka žmogaus kūno šiluminio spinduliavimo (37 °C) maksimumas?**

## 128. Spektrų rūšys. Spektrinė analizė

**Gerai įkaitinti kietieji ir skystieji kūnai, taip pat ir dujos, esant labai dideliam slėgiui, spinduliuoja ištisiniùs spektrùs. Aukštos temperatūros elementų garai ir vienatomės dujos, esant atmosferiniam arba dar mažesniam slėgiui, spinduliuoja vadinamuosius linijiniùs spektrùs, kuriuos dar galima gauti leidžiant elektros srovę pro praretintas vienatomes dujas ar elementų garus. Cheminių elementų ir jų junginių molekulės spinduliuoja júostinius spektrùs, sudarytus iš atskirų labai tankių linijų grupių, vadinamųjų júostų.**

Kai spektroskopo skiriamoji geba didelė, juostiniai spektrai išsisklaido į labai daug plonų linijų. Žiūrėdami pro spektroskopą į bespalvę dujinio degiklio liepsną, matome labai silpną spektrą, kurį spinduliuoja nežymus kiekis kietų įkaitusių anglies dalelių, visada esančių dujų liepsnoje. Į šią liepsną įkiškime asbesto gabalėlį, įmirkytą valgomosios druskos tirpale. Natrio garai nuspalvina liepsną geltonai, ir spektre atsiranda ryški geltona linija. Taip gauname natrio linijinį emisijos spektrą (4 pav. (sp.)). Įnešę į degiklio liepsną kitokius elementus, gausime kitokio pavidalo spektrus, kuriuos sudarys didesnis ar mažesnis skaičius atskirų spalvotų linijų, išsidėsčiusių įvairiose spektro dalyse.

Jeigu baltų šviesos spindulių kelyje padėsime kokį nors kūną, sugeriantį vienus ar kitus spektro spindulius, tai ištisiniame spektre gausime tamsias linijas arba

ruožus. Šių tamsių linijų arba ruožų išsidėstymas atitinka spalvotų linijų arba ruožų išsidėstymą tos pačios medžiagos emisijos spektre. Pavyzdžiui, pažiūrėkime į spektrą, kurį gauname praėjus įkaitusio kūno skleidžiamiems spinduliams pro natrio garus. Ištisinio spektro geltonojoje dalyje pastebėsime tamsų ruožą tiksliai toje pačioje spektro vietoje, kur emisijos spektre yra natrio garų geltonoji linija (4 pav. (sp.)). Kitų medžiagų garai sugeria atitinkamai kitokias šviesos bangas. Šį emisijos ir sugerties ryšį pastebėjo G. Kirchhofas (*Kirchhoff*) su R. Bunzenu (*Bunsen*) ir nustatė dėsnį, kad **kiekvieno elemento atomai sugeria tas šviesos bangas, kurias jie patys skleidžia.**

**Įkaitusių kietųjų arba skystųjų kūnų spektrai, perkirsti tamsių linijų arba ruožų, kurie atsiranda dėl to, kad įvairios aplinkoje esančios medžiagos sugeria įvairaus ilgio šviesos bangas, vadinami sugertiẽs (absòrbcijos) spèktrais.**

G. Kirchhofo ir R. Bunzeno nustatytasis dėsnis plačiai taikomas spèktrinėje anãlizėje. **Spektrine analize vadinamas metodas nustatyti įvairių medžiagų cheminei sudėčiai pagal jų sugertus ir linijinius emisijos spektrus.** Kiekvienų dujų arba garų spektras yra būdingas tik toms dujoms. Radę tam tikroje spektro vietoje, pavyzdžiui, geltoną liniją, galime neabejodami tvirtinti, kad šviesos šaltinyje yra natrio garų; radę būdingą žalią liniją, sakome, kad čia turi būti talio, ir pan. Žinodami, kokio ilgio bangas spinduliuoja įvairios dujos ir garai, galime pagal spektrą nustatyti, kokių medžiagų yra spektre. Jeigu spektre atsiras linijų, neatitinkančių nė vieno mums žinomo elemento, galime tvirtinti, kad rastas naujas elementas. Šiuo būdu buvo atrasti tokie elementai, kaip helis, rubidis, cezis, talis, indis, galis ir kt.

Tyrinėdami spektroskopu Saulės spektrą, pastebime daugybę tamsių linijų, išsidėsčiusių įvairiose ištisinio emisijos spektro fono dalyse (4 pav. (sp.)).

Šias tamsias linijas aprašė J. Fraunhoferis (*Fraunhofer*), todėl jos ir vadinamos *Fraunhòferio lìnijomis*. Nustačius jų padėtį spektre, galime sužinoti, pro kokias Saulės atmosferos medžiagas ėjo Saulės spinduliai iš fotosferos. Taip pat galime nustatyti, kurios tamsios linijos atsirado dėl spindulių sugerties Žemės atmosferoje ir kurios – Saulės atmosferoje. Tokiais metodais buvo nustatyta, kad Saulės atmosferoje yra beveik visi elementai, kurie randami ir Žemėje.

Spektrinės analizės metodas yra nepaprastai jautrus. Šiuo metodu galima aptikti kai kuriuos elementus net ir tuomet, kai jų kiekis yra lygus $10^{-10}$–$10^{-13}$ kg, ko neįmanoma padaryti cheminiais metodais.

Iš atitinkamos linijos intensyvumo galima spręsti ir apie cheminio elemento kiekį tiriamame mišinyje.

## Klausimai ir užduotys

**1. Kaip gaunami linijiniai ir ištisiniai spektrai?**

**2. Palyginkite emisijos ir sugerties (absorbcijos) spektrus.**

**3. Suformuluokite Kirchhofo ir Buzeno dėsnį.**

**4. Kokia spektrinės analizės metodo esmė? Palyginkite ją su chemine analize.**

**5. Kokios rūšies spektrus gausime iš šių šaltinių: žvakės liepsnos, laužo liepsnos, elektrinės viryklės spiralės, elektros lanko liepsnos, neono lempos, dienos šviesos lempos? Atsakymus pagrįskite.**

**6. Kokie yra Saulės, Mėnulio, planetų ir žvaigždžių spektrai?**

## 129. Spektroskopas ir spektrografas

**Spektrams tyrinėti plačiai naudojami prizminiai prietaisai, kurie vadinami spektroskòpais arba spektrogrãfais.** Pirmieji skirti spektrams vizualiai stebėti, o antrieji – jiems fotografuoti. Spektroskopo įrengimo schema parodyta 5 spalvotame paveiksle.

Vamzdyje *A*, kuris vadinamas *kolimãtoriumi*, išpjautas siauras plyšys *S*, esantis lęšio $L_1$ židinio nuotolyje. Todėl sudėtinė, pavyzdžiui, balta šviesa, praėjusi pro plyšį ir pro lęšį $L_1$, toliau sklinda lygiagrečių spindulių pluoštu, krinta į prizmę ir išsiskaido į spalvotus spindulių pluoštelius, kuriuose tos pačios spalvos spinduliai yra tarp savęs lygiagretūs. Lęšis $L_2$ surenka šiuos pluoštelius įvairiuose savo židinio plokštumos *MN* taškuose. Toje plokštumoje gaunami spalvoti plyšio atvaizdai, t. y. spektras. Jeigu plokštumoje *MN* padėsime matinį stiklą, tai ant jo gausime spektro atvaizdą. Pakeitę stiklą fotografine plokštele, galėsime spektrą nufotografuoti. **Prietaisas, kuriame spektras gaunamas fotografinėje plokštelėje, yra vadinamas spektrografu.**

Spektroskope, vietoj plokštelės *MN*, įtaisomas okuliaras, pro kurį akimi stebimas spektro atvaizdas. Jeigu okuliaro regėjimo lauke yra skalė, tokius prietaisus vadiname *spektromètrais*.

### Klausimai ir užduotys

**1. Kokia yra spektroskopo sandara?**

**2. Palyginkite spektroskopą su spektrografu, nurodydami jų panašumus bei skirtumus.**

**3. Kas būdinga spektrometrui?**

**4. Ar vienodi Saulės, Mėnulio, planetų ir žvaigždžių spektrai? Atsakymą pagrįskite.**

**5. Kokiomis lempomis tikslinga apšviesti parduotuvės skyrių, kuriame prekiaujama tekstilės gaminiais?**

## 130. Infraraudonieji ir ultravioletiniai spinduliai

**Infraraudonieji spinduliai – tai elektromagnetinės bangos, kurių ilgis didesnis už regimųjų raudonųjų spindulių bangos ilgį ($\lambda > 0,75$ µm) ir siekia iki 0,3 mm. Pagrindinė šių spindulių savybė – šiluminis veikimas.** Infraraudonuosius spindulius skleidžia visi įkaitę kūnai: pavyzdžiui, kietos medžiagos, kurių temperatūra žemesnė kaip 800 K, skleidžia tik infraraudonuosius spindulius, apie 50% visos energijos šiais spinduliais išspinduliuoja Saulė ($T \approx 6000$ K). Infraraudonąjį spinduliavimą galima tirti įvairių rūšių termometrais arba specialiomis fotoplokštėmis, fotoelementais bei fotorezistoriais. Infraraudonųjų spindulių optinės savybės (sugertis, atsispindėjimas, lūžis) paprastai skiriasi nuo regimosios šviesos savybių. Pavyzdžiui, kelių centimetrų storio vandens sluoksnis beveik nepraleidžia spindulių, kurių bangos ilgis $\lambda > 1$ µm (todėl vanduo naudojamas kaip termoizoliacinis filtras), o juodas popierius infraraudoniesiems spinduliams yra beveik skaidrus. Langų stiklas pra-

leidžia tik gana trumpų bangų ($\lambda < 2$ μm) infraraudonuosius spindulius, o visus kitus sugeria (6 pav. (sp.)). Infraraudoniesiems spinduliams skirtų spektroskopų prizmės daromos iš kvarco, valgomosios druskos medžiagų.

Stiklo atrankiąja sugertimi (absorbcija) pagrįstas vadinamasis *šil̃tnamio efèktas*. Šiltnamių gruntas įšyla nuo Saulės spindulių (regimąją šviesą ir trumpesnių bangų infraraudonuosius spindulius stiklas praleidžia), nuo biologinės šilumos ir nuo specialios šildymo sistemos. Tačiau grunto temperatūra yra palyginti žema, todėl jis spinduliuoja ilgų bangų infraraudonuosius spindulius ($\lambda \gg 2$ μm), kuriuos stiklas, kaip minėjome, sugeria. Taigi didelė dalis grunto spinduliuojamos energijos vėl grįžta į šiltnamį. Vadinasi, stiklas, sugerdamas ilgesnių bangų infraraudonuosius spindulius, sumažina šiltnamių grunto spinduliavimo nuostolius.

Pastaraisiais metais šiltnamių ir inspektų stiklus pradėta keisti patogesnėmis medžiagomis – skaidriais polimerais, t. y. poliamidinėmis plėvelėmis. Skirtingai nuo stiklo, šios plėvelės praleidžia ne tik regimąją šviesą, bet ir ultravioletinius spindulius, tačiau smarkiai sugeria (apie 90%) ilgesnių bangų infraraudonuosius spindulius.

Šiuo metu infraraudonieji spinduliai plačiai taikomi fotografijoje. Panaudojant šiuos spindulius, galima fotografuoti didesniu nuotoliu (ilgesnės bangos mažiau išbarstomos), pavyksta užfiksuoti detales, kurios regimosios šviesos nuotraukoje nepalieka pėdsako (infraraudonieji spinduliai atsispindi ir sugeriami ne taip, kaip regimoji šviesa). Be to, galima fotografuoti visiškoje tamsoje ar esant rūkui. Iš infraraudonųjų spindulių nuotraukų galima, pavyzdžiui, susekti kai kurias augalų ligas. 7 spalvotame paveiksle parodyta nuotrauka, gauta paprastais spinduliais, o 8 spalvotame paveiksle – infraraudonaisiais spinduliais.

Panaudojant jautrius infraraudoniesiems spinduliams fotokatodus (pvz., cezio oksido), sukurti elektroniniai optiniai keitikliai, kuriais akiai nematomi infraraudonųjų spindulių sukurti atvaizdai paverčiami matomais. Šiuo principu veikia naktiniai žiūronai, taikikliai ir kt.

Ultravioletiniai spinduliai akiai taip pat nematomi. Jų bangų ilgis yra mažesnis už violetinių spindulių bangų ilgius: $\lambda = 0{,}4–0{,}002$ μm. Šių spindulių paprastas stiklas nepraleidžia. Kvarcas ($SiO_2$) ir valgomoji druska (NaCl) praleidžia ultravioletinius spindulius, kurių bangos ilgis yra mažesnis už 0,2 μm, o fluoritas ($CaF_2$ – brangakmenis) – spindulius, kurių bangos ilgis mažesnis už 0,12 μm. Iš šių medžiagų paprastai yra gaminamos prizmės ultravioletiniams spinduliams tirti.

Ultravioletiniai spinduliai sukelia medžiagų liuminescenciją (švytėjimą), fotoelektrinį efektą, veikia fotografinę plokštelę. Jie pasižymi stipriu biologiniu veikimu ir yra labai reikšmingi žmonių, gyvulių bei augalų gyvenime. Pirminis jų poveikis gyviesiems organizmams yra susijęs su fotocheminėmis reakcijomis. Trumpųjų bangų ultravioletiniai spinduliai ($\lambda < 0{,}3$ μm) yra kenksmingi (ypač regėjimui). Tačiau Žemės atmosferos ozonas juos intensyviai sugeria (12–50 km aukštyje), todėl šie iš Saulės sklindantys ultravioletiniai spinduliai nepasiekia Žemės paviršiaus. Trumpesnių bangų ultravioletiniai spinduliai užmuša mikroorganizmus, todėl plačiai naudojami patalpoms dezinfekuoti, pienui bei vandeniui sterilizuoti.

Galingą ultravioletinių spindulių srautą spinduliuoja plačiai taikomos gyvsidabrio (kvarco) lempos. Jų energijos maksimumas spinduliuojamas bangomis, kurių ilgis $\lambda = 0{,}365$ μm. Šie spinduliai skatina vitamino D gamybą gyvuosiuose organizmuose, todėl kvarco lempos plačiai naudojamos medicinoje, gyvulininkystėje bei paukštininkystėje.

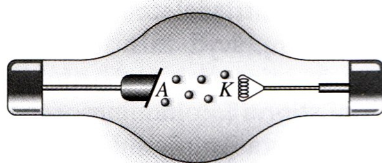
## Klausimai ir užduotys

**1. Kokius spindulius priskiriame infraraudoniesiems spinduliams?**
**2. Kokios yra šių spindulių savybės?**
**3. Kas skleidžia infraraudonuosius spindulius?**
**4. Kaip tiriamas infraraudonasis spinduliavimas?**
**5. Papasakokite apie infraraudonųjų spindulių taikymą.**
**6. Kokio ilgio elektromagnetinės bangos priskiriamos ultravioletiniams spinduliams?**
**7. Apibūdinkite ultravioletinių spindulių savybes.**
**8. Papasakokite apie biologinį ultravioletinių spindulių veikimą.**

# 131. Rentgeno spinduliai

**Reñtgeno spinduliaĩs vadinamos elektromagnetinės bangos, kurių bangos ilgis nuo 20 mm iki 1 pm.** Iš šių spindulių spektrų pavyko nustatyti atomų elektronų pasiskirstymą sluoksniais ir atomų branduolių krūvius. Rentgeno spinduliai veikia fotografinę plokštelę, sukelia kai kurių medžiagų liuminescenciją, jonizuoja medžiagų molekules (ypač stipriai jonizuoja dujas), biologiškai veikia ląsteles. Dėl šių savybių ir didelės skvarbos jie plačiai taikomi praktikoje. Įvairios medžiagos skirtingai sugeria rentgeno spindulius. Ištirta, kad jų sugertis proporcinga elemento eilės numerio ketvirtajam laipsniui. Vadinasi, sunkesnieji elementai juos sugeria gerokai stipriau už lengvesniuosius. Ši savybė plačiai naudojama taikant rentgeno spindulius technikoje ir medicinoje. Rentgeno spinduliais galima nustatyti įvairius liejinių bei detalių defektus (tuštumas, šlako intarpus ir pan.). Medicinoje rentgeno spinduliai taikomi diagnostikai (organų peršvietimui) ir terapijai (piktybinių auglių švitinimui). Rentgeno spinduliai sukelia morfologinius bei funkcinius ląstelių pakitimus, todėl mėginama išvesti naujas, vertingesnes augalų rūšis švitinant jais augalų sėklas.

Dabartiniu metu rentgeno spinduliams gauti naudojamos lempos, sudarytos iš stiklinio vakuuminio baliono, kurio viduje yra katodas $K$ ir anodas $A$ (316 pav.). Katodą (spiralę) pakaitinus elektros srove, iš jo išlekia elektronų srautas. Tarp katodo ir anodo prijungiama keliasdešimties tūkstančių voltų įtampa ir susidaręs elektrinis laukas labai pagreitina elektronus, suteikdamas jiems didelę kinetinę energiją. Pasiekusius anodą elektronus jo medžiaga smarkiai stabdo, todėl atsiranda elektromagnetinė rentgeno spinduliuotė. Tačiau tik maža elektronų energijos dalis virsta rentgeno spindulių energija, tuo tarpu didžioji energijos dalis virsta šiluma, todėl anodą reikia gaminti iš aukštoje temperatūroje nesilydančių metalų, o galingesnėse lempose – dar ir aušinti.



316 pav.

Kol lempos įtampa ir elektronų energija nepasiekia tam tikros vertės, rentgeno spindulius skleidžia patys stabdomi elektronai. Kadangi ne-

vienoda jų energijos dalis virsta šiluma, šių spindulių bangos ilgiai taip pat būna skirtingi. Vadinasi, stabdant elektronų srautą, spinduliuojamas ištisinis rentgeno spindulių spektras, kuris kartais dar vadinamas *baltúoju spektrù*.

Elektronai, daužydami anodą, gali perduoti energiją jo atomams. Kai elektrono energijos užtenka išplėšti atomo elektroną iš kurio nors vidinio sluoksnio, atsiranda vadinamoji *būdiñgoji reñtgeno spinduliuõtė*.

**Klausimai ir užduotys**

1. **Kokias elektromagnetines bangas vadiname rentgeno spinduliais?**
2. **Išvardykite šių spindulių savybes.**
3. **Kuo pagrįstas rentgeno spindulių taikymas?**
4. **Kaip medžiagos sugeria rentgeno spindulius?**
5. **Kaip gaunami rentgeno spinduliai?**

## 132. Liuminescencija

Gamtoje **yra daug medžiagų, kurių atomai bei molekulės, sugėrę tam tikrą kiekį energijos, pereina į naują didesnės energijos būvį, t. y. tampa sužadintaisiais.** Juos gali sužadinti matomoji šviesa, ultravioletiniai, rentgeno bei γ spinduliai, taip pat medžiagą bombarduojantieji elektronai ar kitokios elektringosios dalelės. **Kai sužadinti atomai ar molekulės grįžta į normalią būseną, energijos perteklius dažniausiai išspinduliuojamas šviesos bangų pavidalu.** Toks **„šaltas" kūnų švytėjimas vadinamas liuminesceñcija.** Kitaip tariant, **liuminescencija – tai kūnų papildomas optinis spinduliavimas, vykstantis greta šiluminio spinduliavimo toje pačioje temperatūroje ir kurio trukmė ne mažesnė kaip $10^{-10}$ s.**

Priklausomai nuo sužadinimo būdo liuminescencija esti įvairių rūšių. **Švytėjimas, kurį sukelia regimoji šviesa arba dar trumpesnių bangų elektromagnetiniai spinduliai, vadinamas fotoliuminesceñcija. Vykstant išsielektrinimui** (pvz., dujose), **susidaręs švytėjimas vadinamas elektroliuminesceñcija. Jei medžiagos švytėjimą sukelia elektronai, turime katòdinę liuminesceñciją. Švytėjimas, kurio priežastis yra įvairūs cheminiai pakitimai, vadinamas chèmine liuminesceñcija** (dėl oksidacijos švyti fosforas, pūvantis medis, panašiai švyti įvairūs vabzdžiai ir kt.). **Radioliuminesceñcija vadiname švytėjimą, kurį sukelia α ir β dalelės.**

Iš visų šių švytėjimų rūšių daugiausia ištirta fotoliuminescencija. Ji pastebima dujose, skysčiuose ir kietuosiuose kūnuose, pavyzdžiui, veikiamas matomosios šviesos arba ultravioletinių spindulių, žibalas švyti melsvai; stiklas, turintis urano druskų priemaišų, švyti žalsvai ir pan. Švyti daugelis dažų (ypač neorganinės kilmės) ir įvairūs mineralai. Dabartiniu metu gaminama daug įvairių medžiagų, kurios pasižymi stipria fotoliuminescencija. Jos vadinamos *švytalaĩs*, arba *liuminofòrais*. Tipiški švytalai yra įvairūs sulfidų ($ZnS$, $BaS$, $CaS$ ir kt.) kristalai su sunkiųjų metalų ($Cu$, $Bi$ ir kt.) priemaišomis. Gryni kristalai švyti silpnai, tačiau, pridėjus nežymų kiekį priemaišų (pvz., į $ZnS$ apie $10^{-3}$% $Cu$ arba $Bi$), jie pradeda smarkiai švytėti.

Nutraukus liuminescenciją sužadinantį spinduliavimą, kūnų švytėjimas išnyksta ne akimirksniu, bet tolydžiai silpnėdamas. Įvairių medžiagų švytėjimo trukmė yra skirtinga ir svyruoja labai plačiose ribose – nuo milijardinių sekundės dalių iki keleto valandų ar net parų. **Švytėjimas, kuris akiai atrodo pranykstąs kartu su išorinio spinduliavimo išnykimu, vadinamas fluoresceñcija. Jei akis dar jaučia kūno švytėjimą, nutraukus išorinį spinduliavimą, tai toks švytėjimas vadinamas fosforesceñcija, o šia savybe pasižyminčios medžiagos – fòsforais.**

Liuminescencinis kūnų švytėjimas neturi nieko bendra su šiluminiu spinduliavimu. Pavyzdžiui, daugelis švytalų spinduliuoja regimąją šviesą arba ultravioletinius spindulius kambario temperatūroje, kai tuo tarpu šiluminio spinduliavimo keliu šie kūnai tokioje temperatūroje nespinduliuoja nei ultravioletinių, nei regimųjų spindulių. Vadinasi, liuminescencijai negali būti taikomi šiluminio spinduliavimo dėsningumai.

Tirdamas fotoliuminescencinius spektrus, D. Stoksas pastebėjo, kad jie skiriasi nuo šį reiškinį sužadinančio spinduliavimo spektro. 1852 m. Stoksas nustatė tokią taisyklę: neaukštoje temperatūroje fotoliuminescencinių medžiagų išspinduliuojamos šviesos spektras yra pasistūmęs į ilgesnių bangų pusę, palyginus su jų absorbuotos šviesos spektru, kitaip tariant, fotoliuminescencinis spinduliavimas yra ilgesnių bangų. Taigi ultravioletiniai spinduliai sužadina regimąją šviesą, violetiniai – žalią, raudoną ir pan.

Stokso dėsnį galima paaiškinti remiantis kvantine teorija. Absorbuoto kvanto energija kūno viduje iš dalies virsta kitų rūšių energija, todėl kūnas išspinduliuoja mažesnės energijos kvantą, t. y. didesnio ilgio bangą. Tačiau kai kuriais atvejais pastebima nukrypimų nuo Stokso dėsnio.

Nustatyta, kad skystųjų ir kietųjų kūnų fotoliuminescencinis spektras absorbcijos juostos ribose nepriklauso nuo sužadinančios šviesos bangos ilgio. Jis yra būdingas kiekvienai švytinčiai medžiagai ir priklauso tik nuo jos molekulinės sandaros. Liuminescenciniai medžiagų spektrai daugiausia yra juostiniai, t. y. molekuliniai.

Tiriant liuminescencijos reiškinius, daug pasidarbavo akademikas S. Vavilovas, kuris nustatė ryšį tarp švytinčių medžiagų sugertos ir išspinduliuotos energijos. Jis ištyrė, kad tokios medžiagos išspinduliuoja didelę sugertos energijos dalį – net iki 80%.

Liuminescencijos reiškiniai plačiai taikomi technikoje. Šiuo reiškiniu pagrįsta **liuminesceñcinė anãlizė – medžiagų cheminės sudėties nustatymas iš liuminescencijos spektrų**. Medžiaga, kurios sudėtį reikia ištirti, apšviečiama ultravioletiniais spinduliais. Iš gauto liuminescencijos spektro ir jo linijų intensyvumo galima nustatyti medžiagos kokybinę ir kiekybinę sudėtį. Liuminescencinė analizė yra labai tikslus ir nepaprastai jautrus metodas, todėl naudojama itin mažiems medžiagų kiekiams aptikti (galima nustatyti priemaišas, kurių tėra $10^{-11}$ g viename grame tiriamosios medžiagos). Paprasčiausias liuminescencinės analizės uždavinys – atskirti pagal liuminescencijos pobūdį panašius objektus, pavyzdžiui, rūšiuoti grūdus, susekti produktų gedimą, naudingąsias iškasenas, nustatyti taršą, dokumentų padirbimus, išsiaiškinti nematomą raštą ir kt.

Liuminescencinės medžiagos plačiai naudojamos įvairiems ekranams, kurie nematomus spindulius paverčia regimaisiais, gaminti. Pavyzdžiui, iš jų gaminami ekranai rentgeno bei ultravioletiniams spinduliams stebėti. Katodinių oscilografų, televizijos kineskopų, radiolokatorių ekranų švytėjimą sukelia elektronų srautas. Įvairių matavimo prietaisų, kurių rodmenis reikia matyti ir tamsoje, rodyklės padengiamos švytalais, turinčiais nedidelį kiekį radioaktyviųjų elementų, kurių spinduliavimas sukelia švytalo švytėjimą. Labai svarbus liuminescencijos reiškinių taikymas apšvietimui – gaminamos liuminescencinės, arba dienos šviesos, elektros lempos.

Liuminescencija taip pat naudojama detalių paviršių įskilimams, smulkiems plyšeliams nustatyti. Šis metodas vadinamas *liuminesceñcine defektoskòpija*. Detalė pamerkiama į fluorescuojantį skystį. Esant įtrūkimams, į juos patenka tirpalas, o apšvietus ultravioletiniais spinduliais, tos vietos pradeda švytėti.

Ypač didelę reikšmę turi kristalai, pasižymintys radioliuminescencija. Šiuose kristaluose radioaktyviųjų elementų spinduliuotė sukelia kibirkštėles – *scintiliácijas*. Kristalai – scintiliatoriai (pvz., NaJ kristalai, aktyvinti taliu) naudojami gaminant scintiliatorinius skaitiklius radioaktyviajai spinduliuotei tirti.

## Klausimai ir užduotys

1. **Palyginkite šiluminį ir liuminescencinį spinduliavimą.**
2. **Išvardykite liuminescencijos rūšis ir jų ypatumus.**
3. **Papasakokite apie liuminescensijos taikymą.**

# KVANTINĖ FIZIKA

*Kvántinė fìzika* – tai mikropasaulio fizikos pagrindas, atomo matmenų erdvės srityse vykstančių reiškinių teorija. *Kvánto* sąvoka pirmąkart buvo pavartota tyrinėjant šiluminį kūnų spinduliavimą. Nuo to prasidėjo ištisa didžių atradimų virtinė. Pavyko išaiškinti, pagal kokius dėsnius spinduliuoja šviesą Saulė ir įkaitę kūnai, kaip šviesa išmuša iš metalų elektronus, kokia atomų sandara ir kodėl jie stabilūs. Buvo atrasti reiškiniai, kurių pagrindu veikia *kvántiniai generãtoriai, elektròniniai mikroskòpai, tranzìstoriai* ir kt.

## 21 SKYRIUS. ŠVIESOS KVANTAI. ŠVIESOS VEIKIMAS

### 133. M. Planko kvantų hipotezė. Fotonai

1900 m. vokiečių fizikas Maksas Plankas (*Planck*), nagrinėdamas karštų kūnų spinduliavimo problemas, padarė prielaidą, kad **bet kokios medžiagos atomai skleidžia elektromagnetines bangas atskiromis porcijomis – kvantais**.

Kiekvienos porcijos energija priklauso nuo spinduliavimo dažnio. M. Planko hipotezė teigė, kad bangas spinduliuojančių dalelių energija gali kisti tik šuoliais. Kvantą, kurio dažnis *t*, atitinka energijos kiekis, lygus Planko konstantai, padaugintai iš *f*, t. y.

$$E = hf; \qquad (298)$$

čia $h$ – proporcingumo koeficientas, šiuo metu žinomas kaip Planko konstanta. Planko šiluminio spinduliavimo teorija gana gerai atitiko eksperimentines tyrimų išvadas. Remiantis eksperimentais apie energijos pasiskirstymą pagal dažnį, buvo apskaičiuota Planko konstanta. Ji nepaprastai maža ir lygi $h = 6{,}625 \cdot 10^{-34}$ Js.

Tuo metu, kai Plankas kūrė absoliučiai juodo kūno spinduliavimo teoriją, dar nebuvo tiesioginių eksperimentinių įrodymų, kad egzistuoja spinduliavimo kvantai. Be fizikinio šios sąvokos paaiškinimo neįmanoma buvo išsiversti nagrinėjant absoliučiai juodo kūno *spinduliuotės* spektrą. Todėl dauguma to meto fizikų Planko pasiūlytą metodą šiam spektrui paaiškinti priėmė labai nerimtai. Dar 1900 m. vyravo nuomonė, kad visi fizikiniai procesai vyksta nenutrūkstamai (tolygiai), ir net pats Plankas neįsivaizdavo, jog visas elektromagnetinis spinduliavimas – kvantuotas. Jo siūloma kvantų hipotezė apėmė tik energijos mainus tarp spindulių ir ertmės. Todėl tikrai didi idėja, kurios vienos užteko spinduliavimo prigimčiai suprasti, – kvantų hipotezė – buvo ignoruojama ir toliau neplėtojama.

Po keleto metų Planko idėją atgaivino A. Einšteinas, aiškindamas fotoelektrinį efektą. Jis toliau plėtojo Planko hipotezę ir teigė, kad visi elektromagnetiniai spinduliai spinduliuojami ar sugeriami tik kvantais (fotonais). Pagaliau po ilgų dvejonių ir abejojimų viso pasaulio mokslininkai pripažino Planko idėją, ir 1918 m. už kvantų sąvokos sukūrimą ir absoliučiai juodo kūno spindulių spektro išaiškinimą jam buvo paskirta Nobelio premija. Vadinasi, *šviesa spinduliuojama ir sugeriama kaip srautas dalelių, kurių energija priklauso nuo šviesos dažnio* (298 lygtis). **Šviesos savybės, kuriomis ji pasižymi spinduliavimo ir absorbcijos metu, vadinamos korpuskulìnėmis, o pati dalelė buvo pavadinta fotonù arba šviesõs kvántu, kurio energija yra griežtai apibrėžta.**

Fotono energija dažnai išreiškiama ne dažniu $f$, bet kampiniu dažniu $\omega = 2\pi f$. Vietoj Planko konstantos $h$ rašomas dydis $\hbar$ (ha su brūkšneliu), lygus $\hbar = \dfrac{h}{2\pi}$. Jo skaitinė vertė lygi $\hbar = 1{,}0545887(57) \cdot 10^{-34}$ Js. Fotono energijos formulė tada užrašoma taip:

$$E = hf = \hbar\omega. \tag{299}$$

Iš reliatyvumo teorijos žinome, kad energija su mase susijusios lygtimi $E = mc^2$. Remdamiesi pastarąja lygtimi bei 298 formule ir perdirbę jas matematiškai, gauname fotono masės išraišką:

$$m = \frac{hf}{c^2}. \tag{300}$$

Iš šios lygties akivaizdžiai matome, jog **fotono rimties masė $m_0$ lygi nuliui**. Tai reiškia, kad jis egzistuoja tik judėdamas greičiais, artimais šviesos greičiui (**atsiradęs fotonas tuoj pat įgyja šviesos greitį**).

Fotono judesio kiekis užrašomas lygtimi

$$p = mc = \frac{h\upsilon}{c} = \frac{h}{\lambda}. \tag{301}$$

Šviesos judesio kiekio kryptis sutampa su šviesos spindulio sklidimo kryptimi.

Remiantis 298 ir 301 formulėmis, akivaizdžiai matyti, jog, **didėjant šviesos bangos dažniui, fotono energija bei impulsas irgi didėja**. Galima daryti išvadą, kad **kuo didesnis šviesos dažnis, tuo ryškesnės šviesos korpuskulinės savybės**. Kaip jau buvo minėta, Planko konstanta yra ganėtinai maža, todėl regimosios šviesos fotonų energija yra nedidelė (žr. 15 lentelę).

Nežiūrint to, kad kvanto energija labai maža, rusų mokslininkas S. Vavilovas, atlikdamas eksperimentus žmogaus regėjimo savybėms ištirti, gavo stulbinančius rezultatus, iš kurių padarė išvadą, kad subtiliausias „prietaisas" – žmogaus akis – geba reaguoti į apšvietų skirtumą, lygų keletui kvantų.

15 lentelė

**Elektromagnetinių spindulių charakteristikos**

| Spindulių rūšis | Bangos ilgis, nm | Dažnis, THz | Fotono energija, eV |
|---|---|---|---|
| Gama spinduliai | $10^{-11}$ cm | $3 \cdot 10^{21}$ s$^{-1}$ | 12 MeV |
| Rentgeno spinduliai | $10^{-9}$ cm | $3 \cdot 10^{19}$ s$^{-1}$ | 120 keV |
| Ultravioletiniai spinduliai | $10^{-5}$ cm | $3 \cdot 10^{15}$ s$^{-1}$ | 12 eV |
| Regimoji šviesa: | | | |
| raudona | 760–620 | 395–483 | $1{,}6 \cdot 10^{-3}$–$2{,}0 \cdot 10^{-3}$ |
| oranžinė | 620–590 | 483–508 | $2{,}0 \cdot 10^{-3}$–$2{,}1 \cdot 10^{-3}$ |
| geltona | 590–560 | 508–536 | $2{,}1 \cdot 10^{-3}$–$2{,}2 \cdot 10^{-3}$ |
| žalia | 560–500 | 536–600 | $2{,}2 \cdot 10^{-3}$–$2{,}48 \cdot 10^{-3}$ |
| žydra | 500–480 | 600–625 | $2{,}48 \cdot 10^{-3}$–$2{,}59 \cdot 10^{-3}$ |
| mėlyna | 480–450 | 625–666 | $2{,}59 \cdot 10^{-3}$–$2{,}75 \cdot 10^{-3}$ |
| violetinė | 450–380 | 666–789 | $2{,}75 \cdot 10^{-3}$–$3{,}26 \cdot 10^{-3}$ |
| Infraraudonieji spinduliai | $10^{-3}$ cm | $3 \cdot 10^{13}$ | 0,12 eV |
| Mikrobangų spinduliai | 1 cm | $3 \cdot 10^{10}$ | $1{,}2 \cdot 10^{-4}$ eV |
| Radijo bangos | $3 \cdot 10^{4}$ cm = 300 m | $10^{6}$ | $4 \cdot 10^{-9}$eV* |

* Kadangi bangos ilgis didelis, o ją atitinkanti energija labai maža, todėl kvantinis radijo bangų pobūdis tampa visai neesminis. Kitaip tariant, atskiro kvanto energija tokia maža, kad negalime nurodyti eksperimento, kuriame kvanto sukeltą efektą būtų galima išmatuoti.

## Klausimai ir užduotys

**1. Kokie yra spinduliai, kurių fotono energija lygi 3 eV?**

**2. Rubino lazeris per vieną žybsnį išspinduliuoja $2 \cdot 10^{19}$ šviesos kvantų, kurių bangos ilgis 694 nm. Žybsnis trunka $2 \cdot 10^{-1}$ s. Kokia vidutinė lazerio žybsnio galia?**

**3. Apskaičiuokite infraraudonųjų spindulių, kurių dažnis 30 THz, fotono energiją, masę ir impulsą.**

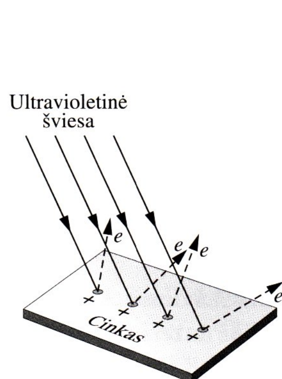
## 134. Fotoefektas. Fotoefekto taikymas

1887 m. Heinrichas Hercas (*Hertz*), pirmasis atradęs elektromagnetines bangas, pastebėjo, kad elektros kibirkštis tarp dviejų aukštos įtampos elektrodų pasidaro ryškesnė apšvietus elektrodus ultravioletine šviesa. Tuoj pat šį reiškinį ėmė tirti ir kiti mokslininkai, pavyzdžiui, buvo išaiškinta, kad apšviesta ultravioletiniais spinduliais gryno cinko plokštelė įsielektrina teigiamai (317 pav.). Iš šių eksperimentų padaryta išvada, kad, apšvietus medžiagą, iš jos išlekia elektronai.

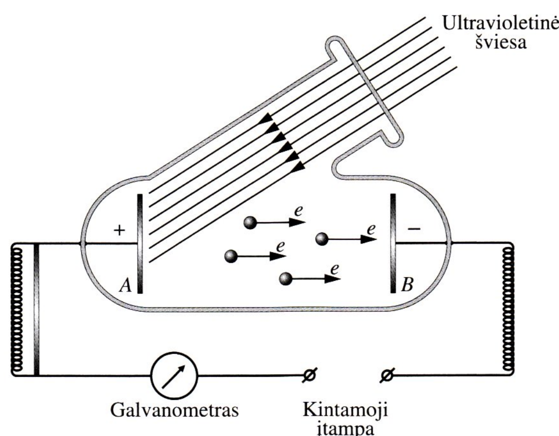
Herco eksperimente išlaisvinti elektronai padidino kibirkšties tarp elektrodų laidumą, dėl to, apšvietus ultravioletine šviesa, kibirkštis pasidarydavo ryškesnė. Bandyme su cinko plokštele, ultravioletiniams spinduliams išlaisvinus elektronus, plokštelė įsielektrino teigiamai. **Reiškinys, kuriam esant šviesa iš medžiagos išlaisvina elektronus, buvo pavadintas fotoelektriniù efektù (fotoefektù).**

Kokybinis fotoefekto aiškinimas, kad šiame procese šviesa išlaisvina iš medžiagos elektronus, buvo ne toks jau netikėtas. Tuo metu buvo manoma, jog šviesa – tai elektromagnetinę energiją perduodantys kintamieji elektriniai ir magnetiniai laukai. Tai, kad elektromagnetinės bangos gali metalo elektronams perduoti energiją, o, gavęs pakankamai energijos, elektronas gali išlėkti už metalo, visiškai atitiko klasikinę teoriją. Tačiau, toliau eksperimentuojant, paaiškėjo, kad kai kurie fotoefekto ypatumai neatitinka to, ką numatė klasikinė elektromagnetinė bangų teorija.

Kiekybiniai duomenys apie fotoefektą buvo gauti panaudojus įrenginį, panašų į atvaizduotąjį 318 paveiksle. Iš vamzdelio buvo išsiurbtas oras ir jame įmontuotos dvi plokštelės (elektrodai) *A* ir *B*, prijungtos prie kintamosios įtampos šaltinio. Į tą pačią grandinę įjungtas jautrus prietaisas srovei matuoti (galvanometras arba miliampermetras). Iš plokštelės *A* paviršiaus vyksta fotoemisija – apšvietus ultravioletine šviesa, iš jos išlekia elektronai; plokštelė *B* tuos elektronus surenka. Tokiu įrenginiu galima ištirti, kaip elektronų srovė priklauso nuo ultravioletinių spindulių dažnio ir intensyvumo, taip pat nuo įtampos tarp plokštelių A ir *B*. Be to, juo galima išaiškinti, kokią įtaką fotoefektui turi metalas, iš kurio pagamintas spinduliuojantysis paviršius. Paaiškėjo, kad kai kurios medžiagos, pavyzdžiui, litis, natris ir kalis,




317 pav.




318 pav.

apšviestos regimąja mėlyna šviesa, spinduliuoja fotoelektronus, bet daugumoje kitų medžiagų fotoefektą sukelia tik aukštesnių dažnių ultravioletiniai spinduliai.

Vienas iš svarbesnių bandymų fotoefektui tirti buvo maksimalios stabdymo įtampos matavimai. Taip vadinama įtampa, stabdanti net pačius greičiausius fotoelektronus, išlėkusius iš tam tikro dažnio ultravioletiniais spinduliais apšviestos plokštelės *A*. Plokštelei *B* suteiktas neigiamas plokštelės *A* atžvilgiu potencialas lėtina judančius nuo *A* link *B* elektronus. Jei stabdymo įtampa pakankamai didelė, tai nė vienas elektronas nepasiekia plokštelės *B*, ir grandinėje įjungtas miliampermetras rodo nulį. Taigi, didinant neigiamąjį plokštelės B potencialą ir tuo pat metu matuojant elektros srovę grandinėje, galima nustatyti įtampą $U_{St}$, visiškai sustabdančią elektronus. Atlikus tokius matavimus, buvo padarytos svarbios išvados: $U_{St}$ yra proporcinga apšviečiančios plokštelę *A* ultravioletinės spinduliuotės dažniui. Kiek vėliau buvo nustatytas ribinis dažnis $f_r$, už kurį mažesnio dažnio spinduliai jau nesukelia fotoefekto, kad ir kokie intensyvūs jie būtų. Taip pat paaiškėjo, kad, esant bet kokiam didesniam už $f_r$ dažniui, išmuštųjų fotoelektronų skaičius proporcingas ultravioletinių spindulių intensyvumui.

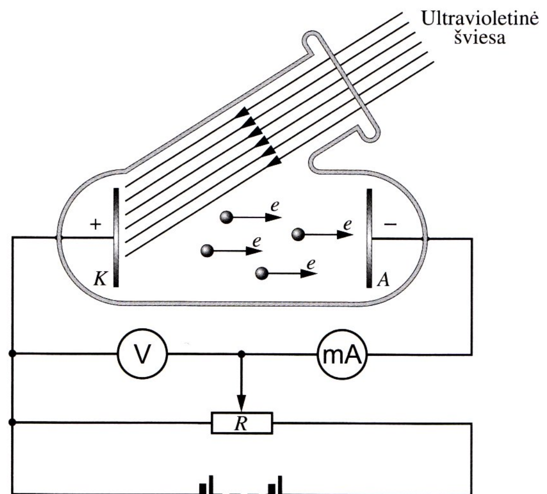
Jeigu elektroną sustabdo įtampa tarp plokštelių $U_{St}$, tai pradinė jo kinetinė energija bus lygi $E_{kin} = eU_{St}$. Vadinasi, $eU_{St}$ yra maksimali išlekiančių elektronų kinetinė energija. Giliau negu iš medžiagos paviršiaus išlaisvinti elektronai, prieš išlėkdami išorėn, dalį savo kinetinės energijos praranda.

Taigi fotoefekto teorija turėjo paaiškinti šitokius eksperimentinius faktus:

1. Nuo ultravioletinės šviesos intensyvumo priklauso tik išlekiančių elektronų skaičius, o stabdymo įtampa, būtina jiems sustabdyti (kitaip tariant, išlekiančių elektronų energija), nuo jo nepriklauso.

2. Maksimali fotoelektronų energija priklauso tik nuo ultravioletinių spindulių dažnio.

3. Kiekvienai medžiagai egzistuoja tam tikras ribinis dažnis $f_r$, ir mažesnio dažnio ultravioletiniai spinduliai, nors ir labai intensyvūs, neįstengia išlaisvinti fotoelektronų. Tačiau jei $f > f_r$, tai, net ir esant labai menkam ultravioletinių spindulių srautui, fotoelektronų (kad ir labai nedaug) bus išlaisvinama. Be to, įjungus spindulių šaltinį, fotoelektronai išlekia tuo pačiu momentu.



319 pav.

Pagal klasikinę teoriją ultravioletinė spinduliuotė suteikia spinduliuojančiam paviršiui energijos ir, vos tik sukaupęs pakankamą jos kiekį, kuris nors iš elektronų išlekia iš paviršiaus. Intensyvesni ultravioletiniai spinduliai išmuša daugiau elektronų, kurie prie plokštelės *K* (kitaip dar vadinamos katodù) sudaro elektronų debesėlį (319 pav.). Vadinasi, pirmojo anksčiau minėto eksperimentinio fak-

to pirmąją dalį klasikinė teorija sugeba paaiškinti. Tačiau ji visiškai neįstengia paaiškinti visų kitų faktų, pavyzdžiui, jei ultravioletiniai spinduliai nelabai intensyvūs, tai pagal klasikinę fiziką turėtų praeiti kažkiek laiko, kol vienas iš elektronų sukaups pakankamai energijos ir galės išlėkti. Deja, eksperimentiniai duomenys tai paneigia.

1905 m. Einšteinas pasiūlė teoriją, paaiškinančią visus eksperimentinius duomenis, susijusius su fotoefekto reiškiniu. Jo sukurta fotoefekto teorija nuostabiai paprasta. Ji tokia pat trumpa ir elegantiška, kaip ir reliatyvumo teorija (kurią Einšteinas paskelbė tais pačiais metais). A. Einšteinas, apibendrinęs Planko hipotezę apie energijos mainus šviesos kvantais, padarė prielaidą, kad **bet kokie elektromagnetiniai spinduliai yra elektromagnetinės energijos diskretinės sankaupos, pavadintos kvántais, arba fotònais**. Po to jis padarė prielaidą, kad, **sąveikaudamas su medžiaga, fotonas elgiasi kaip dalelė ir savo energiją atiduoda ne medžiagai kaip visumai, ir net ne atomui kaip vienetui, o tik atskiriems jo elektronams. Ribinė fotoefekto energija egzistuoja todėl, kad elektronui išlaisvinti iš medžiagos reikalingas tam tikras energijos kiekis** (netgi kai iš medžiagos išėjusio elektrono kinetinė energija lygi nuliui). Skirtingų medžiagų ši ribinė energija yra skirtinga.

Pagal Einšteiną, **fotoelektrono kinetinė energija turi būti lygi ultravioletinių spindulių fotono energijos ir mažiausios energijos, kurios reikia elektronui iš medžiagos išlaisvinti (vadinamos tos medžiagos išláisvinimo dárbu), skirtumui**. Fotono energiją išreiškus $hf$, galima užrašyti tokią lygtį: $E_k = hf - A$; čia $E_k$ – elektrono kinetinė energija, $A$ – išlaisvinimo iš medžiagos darbas.

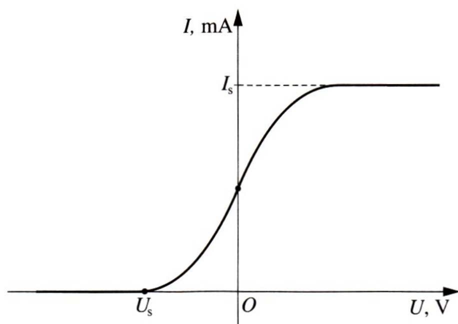
Matematiškai pertvarkę šią lygtį, gauname:

$$hf = A + E_k. \qquad (302)$$

Tai – A. Einšteino išvesta fotoefekto reiškinio lygtis, iš kurios akivaizdžiai matome, **kad krintančio į medžiagos paviršių šviesos kvanto energija sunaudojama elektrono išlaisvinimo darbui atlikti ir jo kinetinei energijai suteikti**.

Vadinasi, *nesant lempoje elektrinio lauko, elektronai, turintys didžiausią kinetinę energiją, pasieks anodą ir anodinėje grandinėje sukurs elektros srovę, kurios stiprį parodo įjungtas miliampermetras*.

Elektrinis laukas tarp elektrodų reguliuojamas į elektros grandinę įjungtu reostatu. Susidariusi įtampa tarp katodo ir anodo išmatuojama voltmetru. Tuo tikslu prie apšviečiamo elektrodo (katodo) prijungiamas neigiamasis šaltinio polius, o prie kito elektrodo (anodo) – teigiamasis polius. Veikiant šviesai, išlaisvinti elektronai pradės judėti anodo link, sukeldami elektros srovės stiprėjimą. Esant nedidelei įtampai, ne visi išlaisvinti elektronai pasiekia anodą. Jeigu, nekeisdami šviesos srauto, padidinsime potencialų skirtumą (įtampą) tarp elektrodų, tai elektros srovės stipris pasieks maksimalią vertę ir elektros srovė grandinėje daugiau nebekis (320 pav.). Tokia srovė vadinama *sotiẽs srovè* ($I_S$). Vadinasi, per sekundę



320 pav.

išplėštų iš metalo paviršiaus elektronų skaičius tiesiogiai proporcingas per tą patį laiką absorbuotai šviesos bangos energijai (*hf*). Šį dėsnį nustatė rusų fizikas Aleksandras Stoletovas (1839–1896).

Tam, kad geriau suvoktume fotoefekto reiškinio fizikinę esmę, įsivaizduokime, kad *H* gylio duobutėje guli *m* masės rutuliukas. Gavęs pakankamą energijos kiekį *E*, jis iššoka iš duobutės ir rieda žeme greičiu $v$. Šį procesą galime išreikšti energijos lygtimi $\frac{mv^2}{2} = E - mgH,$ kurioje $mgH$ – rutuliuko „išlaisvinimo iš duobutės darbas" (t. y. vadinamojo potencinio barjero, kurį rutuliukui reikia įveikti, aukštis), o *E* – rutuliukui suteikta energija, analogiška fotono energijai.

Apšvietus metalų paviršių ultravioletine šviesa, išlaisvintų elektronų kinetinės energijos yra skirtingos, nes iš medžiagos vidaus išlaisvinti elektronai, prieš išlėkdami iš paviršiaus, susiduria su atomais ir praranda dalį energijos. Todėl anksčiau aprašytuose bandymuose stabdančioji įtampa $U_{St}$, kuriai esant elektros fotosrovė sumažėja iki nulio, atitinka pačių greičiausių elektronų kinetinę energiją (320 pav.). Kadangi didžiausią greitį įgijusio elektrono kinetinė energija lygi elektrinio lauko energijai ($E_k = eU_{St}$), tai šią mintį matematiškai užrašome taip: $\frac{mv_{max}^2}{2} = eU_{St}$. Iš pastarosios lygties apskaičiuojame didžiausią išlaisvinto elektrono judėjimo greitį:

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2eU_{St}}{m}}; \qquad (303)$$

čia $e$ – elektrono krūvis ($e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C), $m$ – elektrono masė ($m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg).

Bandymais nustatyta, kad, **kintant šviesos intensyvumui (spinduliuotės energijos srauto tankiui), stabdymo įtampa nekinta**. Todėl nekinta ir elektronų kvanto energija. Banginės teorijos požiūriu tai nesuprantama ir nepaaiškinama.

Eksperimentiniu būdu nustatyta, kad, **iš apšviesto metalo paviršiaus išplėštų elektronų kinetinė energija priklauso tik nuo šviesos dažnio**.

Vadinasi, **didžiausia fotoelektronų kinetinė energija tiesiog proporcingai didėja didėjant šviesos dažniui ir nepriklauso nuo spinduliuotės intensyvumo**.

Pasinaudoję eksperimentiniais faktais ir teoriniais dėsningumais, galime daryti šias išvadas:

1) kai krintančios šviesos bangos dažnis $f$ mažesnis už raudonosios fotoefekto ribos dažnį $f_{min}$ (kuris priklauso nuo medžiagos), tai fotoefektas nevyksta: $f < f_{min}$;

2) kiekvienoje medžiagoje fotoefektas pastebimas tik tada, kai krintančios į paviršių šviesos dažnis $f$ viršija tam tikrą mažiausią vertę $f_{min}$, kadangi, norint išplėšti iš metalo elektroną (nors ir nesuteikiant jam kinetinės energijos), reikia atlikti išlaisvinimo darbą $A$: $hf \geq A$.

**Ribinis dažnis $f_{min}$, kuriam esant dar vyksta fotoefektas, vadinamas raudonąja fotoefèkto riba**:

$$f_{min} = \frac{A}{h}. \qquad (304)$$

Kadangi išlaisvinimo darbas priklauso nuo medžiagos rūšies, todėl įvairių medžiagų fotoefekto raudonoji riba $f_{min}$ yra skirtinga.

1916 m. amerikiečių fizikas Robertas Milikenas (*R. Millikan*; 1868–1953) pradėjo kruopščiai tirti fotoefekto reiškinį ir iš gautų eksperimentinių rezultatų duomenų gana tiksliai apskaičiavo elementaraus elektrono krūvio ir Planko konstantos skaitines vertes.

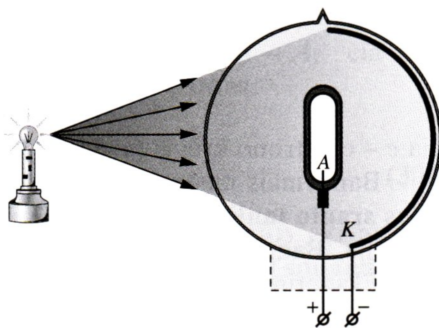
1921 m. už fotoelektrinio efekto teoriją (o ne už reliatyvumo teoriją!) Einšteinas gavo Nobelio premiją, 1923 m. Milikenui už eksperimentinius darbus fotoefekto srityje, nustatant skaitines $e$ ir $h$ vertes, taip pat buvo paskirta Nobelio premija.

Vidinis fotoefektas būdingas puslaidininkiams. Apšviestame puslaidininkyje atsiranda papildomų krūvininkų, vadinasi, padidėja jo elektrinis laidumas. Vidinį fotoefektą gali sukelti ir infraraudonieji spinduliai.

Fotoefektu pagrįstas fotoelemento veikimas. **Fotoelemeñtas – tai prietaisas, kuris šviesos energiją paverčia elektros energija.**

Fotoelementą sudaro stiklinis balionas, kuriame yra vakuumas arba inertinės dujos.

Dalis vidinio baliono paviršiaus padengta šviesai jautriu sluoksniu $K$ (321 pav.). Baliono centre yra vielinio žiedo arba disko formos anodas $A$. Katodą ir anodą prijungus prie įtampos šaltinio ir katodą apšvietus, atsiranda srovė, kurios stipris proporcingas apšvietai. Fotoelementai naudojami kine garsui atkurti, televizijoje vaizdo signalams paversti elektriniais signalais, šviesos stipriui ar ryškiui matuoti ir kt. Jie įmontuojami į fotoreles, kurios automatiškai įjungia ar išjungia gatvių apšvietimo elektros srovės grandinę, saugo darbininkus nuo gamybinių traumų, kontroliuoja gamybinį procesą ir pan.



321 pav.

## Klausimai ir užduotys

**1. Kokių rūšių energija fotoefekto metu virsta krintančiosios šviesos energija?**

**2. Ar fotono poveikis medžiagai priklauso nuo: a) atstumo iki spinduliuotės šaltinio; b) šaltinio galios; c) spinduliuotės dažnio?**

**3. Kodėl, ryškinant fotonuotraukas, laboratorija apšviečiama raudona šviesa?**

**4. Kokia yra aukso fotoefekto raudonoji riba, jeigu elektrono išlaisvinimo darbas lygus 4,59 eV? Ar vyks fotoefektas auksą apšvietus regimąja šviesa?**

**5. Nikelio plokštelė apšviečiama ultravioletiniais spinduliais, kurių bangos ilgis 200 nm. Elektronų išlaisvinimo iš nikelio darbas lygus 5 eV. Kokį greitį įgyja išlaisvinti elektronai?**

**6. Kokią stabdymo įtampą reikia sudaryti tarp fotoelemento gnybtų, norint sustabdyti fotoelektronus, kuriuos skleidžia kalis, apšviečiamas 3301 nm bangos ilgio spinduliais? Kalio fotoefekto raudonoji riba – 620 nm.**

**7. Vakuuminio fotoefekto katodą apšvietus monochromatine šviesa, išlaisvinami fotoelektronai. Kaip pasikeis per sekundę išlaisvinamų fotoelektronų skaičius, jeigu šviesos intensyvumas penkis kartus padidės?**

**8. Rentgeno vamzdis veikia, esant 50 kV įtampai. Kokio mažiausio ilgio bangą jis spinduliuoja?**

**9. Nustatykite, kokia turi būti veikiančio Rentgeno vamzdžio įtampa, jeigu spinduliai jo Rentgeno spektre yra $10^{19}$ Hz dažnio.**

**10. Aplinkos fotoną, turintį $4{,}4 \cdot 10^{-19}$ J energijos, atitinka $3 \cdot 10^{-7}$ m ilgio šviesos banga. Apskaičiuokite tos aplinkos absoliutųjį lūžio rodiklį.**

**11. Žalios šviesos fotonų energija $3{,}31 \cdot 10^{-19}$ J, o jų bangos ilgis glicerine lygus 407 nm. Koks yra glicerino optinis tankis (absoliutusis lūžio rodiklis).**

**12. Volframo raudonoji fotoefekto riba $2{,}75 \cdot 10^{-7}$ m. Apskaičiuokite: a) elektronų išlaisvinimo iš volframo darbą; b) didžiausią fotoelektronų, išplėštų $1{,}8 \cdot 10^{-7}$ bangos ilgio šviesos, greitį; c) didžiausią šių elektronų kinetinę energiją.**

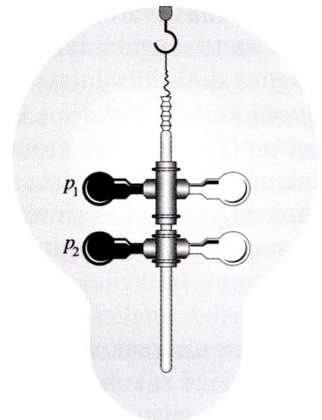
**13. Ar įvyks fotoefektas, jeigu cinką apšviesime 0,45 μm bangos ilgio spinduliais?**

## 135. Šviesos slėgis. P. Lebedevo bandymai

Dar 1619 m. P. Kepleris kometų uodegų atsiradimą bandė aiškinti *šviesõs slėgiù*. Maksvelo sukurtoji elektromagnetinė šviesos teorija teigė, kad šviesa, susidūrusi su kūno paviršiumi, turi jį slėgti.

Daugybė mėginimų patikrinti ir įrodyti šį teorinį spėjimą buvo nesėkmingi. Praėjus 27 metams po Maksvelo teorijos paskelbimo, apie 1901 m., P. Lebedevui pavyko išmatuoti šviesos slėgį. Pagrindinę P. Lebedevo eksperimentinio įrenginio dalį sudarė ant plono kvarcinio siūlelio (322 pav.) pakabinti $P_1$ ir $P_2$ skritulėliai arba sparneliai, kurių vieni buvo išsuodyti (juodi), o kiti – nublizginti (veidrodiniai). Visa ši sistema buvo įdėta į indą, kuriame slėgis tesiekė apie $10^{-4}$ mmHg. Lęšių ir veidrodžių sistema kreipė stiprų šviesos pluoštelį į vienus iš skritulėlių. Slegiant šviesai, sistema pasisuko nežymiu kampu. Norint gauti didesnį sistemos posūkio kampą, šviesos pluoštelis veidrodžiais buvo nukreipiamas tai į vieną, tai į kitą skritulėlių pusę. Tokia sistema buvo verčiama svyruoti (periodiškai pasisukti į vieną ar kitą pusę). Rezonanso atveju posūkio kampas buvo pats didžiausias, ir jį jau buvo galima išmatuoti. Žinant kvarco siūlelio posūkio kampą, apskaičiuota skritulėlius veikianti jėga, o kiek vėliau – ir slėgis.

Šviesai atsispindint nuo veidrodinių skritulėlių, sistema pasisukdavo kampu, didesniu už kampą, kuriuo šviesa atsispindi nuo juodų skritulėlių. Vadinasi, **šviesos slėgis į atspindinčius paviršius yra didesnis**. P. Lebedevo gauti šviesos slėgio dydžiai nedaug (tik apie 20%) tesiskyrė nuo apskaičiuotų pagal elektromagnetinę šviesos bangų teoriją dydžių.



322 pav.

Kiek vėliau, 1910 m., P. Lebedevas atliko dar kruopštesnį eksperimentą ir išmatavo, kaip šviesa slegia dujų molekules. Šviesos slėgis buvo nustatytas tiesioginiu eksperimentu. P. Lebedevo eksperimentų išvados turėjo dar ir kitą labai svarbią reikšmę, nes buvo įrodyta, kad **šviesa, kaip ir medžiaga, turi masę**. Ši eksperimentinė išvada – didžiulis įnašas, sprendžiant svarbiausią mokslinę problemą – šviesos, kaip materijos, prigimties klausimą.

Šviesos slėgis vaizdžiai paaiškinamas jos fotonine prigimtimi. Kiekvienas fotonas, smogdamas į kūną, paveikia jį judesio kiekiu. **Šviesos slėgis lygus visų fotonų, kritusių į paviršiaus ploto vienetą (per laiko vienetą), judesio kiekių sumai.**

Šviesūs kūnai daugiau slegiami todėl, kad dalis fotonų paveikia kūną judesio kiekiu ne tik krentant į kūnus, bet ir nuo jų atsispindint.

## Klausimai ir užduotys

**1. Kodėl šviesa, krintanti į kūnus, juos slegia?**

**2. Paaiškinkite P. Lebedevo eksperimentą.**

**3. Kodėl šviesūs kūnai daugiau slegiami?**

**4. 100 W galios lempa kas 1s išspinduliuoja $2{,}5 \cdot 10^{18}$ fotonų, kurių vidutinis bangos ilgis 500 nm. Kokį slėgį jie sukelia į sferinį juodą paviršių, gaubiantį lempą 2 m atstumu?**

**5. Saulėtą dieną veidrodžio apšvieta lygi 1000 lx. Apskaičiuokite šviesos slėgį į šį veidrodį.**

**6. 0,49 μm bangos ilgio šviesos srautas, krisdamas statmenai į paviršių, sukelia jame 5 μPa slėgį. Kiek fotonų kas sekundę krinta į 1 $m^2$ to paviršiaus, kai jo atspindžio koeficientas lygus 0,25?**

# 136. Cheminis šviesos veikimas ir jo taikymas

**Veikiant šviesai, kūnuose vyksta chèminiai procèsai**. Tai ir yra cheminio šviesos veikimo esmė.

Vienas svarbiausių gamtoje vykstančių fotocheminių procesų – *fotosiñtezė*, kurios metu augalų lapuose ir žolėse esančio chlorofilo molekulės sugeria iš oro anglies dioksido dujas ir suskaido jų molekules į anglies ir deguonies atomus. Deguonį augalai išskiria į aplinką, o prie anglies atomų prijungia iš žemės per šaknis srūvančių elementų atomus. Šitaip susidaro baltymų, riebalų ir angliavandenių molekulės. Augalų išskirtą deguonį gyvūnai vėl pasiima, išskirdami į aplinką anglies dioksidą. Taigi fotosintezė palaiko gyvybę Žemėje. Jos metu Saulės šviesos energija virsta organinių junginių chemine energija, kuri sunaudojama medžiagų apykaitai ir kitoms funkcijoms. Augalai per metus organiniams junginiams pateikia apie 200 mlrd. t. anglies, o visas atmosferoje esantis deguonis susidaro vykstant augaluose fotosintezės reakcijoms.

Šviesa sukelia ir regėjimo pojūtį. Mat šviesai jautri akies tinklainės ląstelėse esanti medžiaga (maždaug 120 mln. lazdelių ir 6 mln. kolbelių) suskyla, o skilimo produktai dirgina nervų galūnes, sukeldami šviesos pojūtį.

Fotocheminėmis reakcijomis šviesai jautriuose sluoksniuose (pavyzdžiui, sidabro bromide) pagrįsta fotografija. Objekto atspindėta šviesa suskaido AgBr molekules, dėl to atsiranda gryno sidabro dalelių. Kur patenka daugiau šviesos, ten suskyla daugiau molekulių ir atsiranda daugiau gryno sidabro. Pamerkus plokštelę į ryškalą, sidabras atsiskiria. Gaunamas negatyvinis objekto vaizdas, kuriame tamsios vietos yra ten, kur pateko daug šviesos. Kad toks vaizdas daugiau nereaguotų į šviesą, jis fiksuojamas – likę sidabro bromido kristalėliai ištirpdomi ir išplaunami. Peršvietus negatyvą ir suprojektavus tą šviesą į fotopopierių, o vėliau jį išryškinus bei užfiksavus, gaunama pozityvinė nuotrauka.

**Kuo mažesnis šviesos bangos ilgis, tuo ryškesnis cheminis šviesos veikimas.** Todėl kino juostas, fotojuostas ir fotonuotraukas galima ryškinti raudonoje šviesoje.

# 22 SKYRIUS. ATOMO FIZIKA

Tiriant medžiagų atomus, buvo sukurta kvantinės mechanikos teorija, kuri tapo tvirtu atomo fizikos teorijos pagrindu. Nuo tada ir prasidėjo gana spartus atomų branduolių ir elementariųjų dalelių tyrimas, kuris tęsiamas iki šiol.

Gerai žinome, kad visa gamta sudaryta iš atomų. Net susijungdami į molekules ir sudarydami kietuosius kūnus, atomai, o ypač jų vidiniai sluoksniai, ne daug kuo pasikeičia.

Pagrindinis atomo fizikos uždavinys – nustatyti elementų atomų banginę funkciją, kuria naudojantis būtų galima apibūdinti visus eksperimentais stebimus atomų ypatumus. Šiuo metu žinoma tik paprasčiausio vandenilio atomo tiksli banginė funkcija. Sudaryti banginę funkciją, aprašančią atomus, turinčius daug elektronų, yra labai sudėtingas matematinis uždavinys, kadangi daugiau kaip dviejų kūnų sąveikos problema nėra ligi šiol tiksliai išspręsta ir klasikinėje mechanikoje. Net naudojantis galingiausiais šiuolaikiniais kompiuteriais nepavyksta tiksliai apskaičiuoti daugiaelektronio atomo savybių. Vis dėlto atomo fizikoje buvo pritaikyti tokie supaprastinimo būdai, kurie skaičiavimų apimtį sumažino milijardus kartų, o jų tikslumą – tik keliais procentais ar net procento dalimis.

Fotonui ar kitai elementariajai dalelei smogus į atomą, jis gali būti *sužãdinamas* (vienas ar keli elektronai peršoka į laisvas aukštesnės energijos orbitas) arba *jonizúojamas* (elektronai visai pašalinami iš atomo ir nulekia kaip laisvieji elektronai).

Pakaitinus medžiagą, atomai pradeda greitai ir chaotiškai judėti. Susidurdami vieni su kitais, jie tampa sužadintaisiais. Grįždami į žemesnės energijos būsenas, atomai spinduliuoja tam tikrų dažnių šviesą. Išskleidus šviesos pluoštelį prizme (nevienodai laužiančia įvairių dažnių spindulius), gaunamas tos medžiagos spinduliuotės spektras. Atpažinus jame matomas atskirų elementų linijas, galima nustatyti cheminę medžiagos sudėtį.

Jeigu iš artimesnio branduoliui elektronų sluoksnio išlekia elektronas, tai jo vietą tuoj pat užima kitas elektronas, esantis tolimesniame sluoksnyje. Šio proceso metu išspinduliuojamas didelės energijos fotonas – taip atsiranda tam elementui būdingi rentgeno spinduliai. (Prisiminkite katodinį vamzdelį ir rentgeno spindulių

atradimą – ten dalis rentgeno spindulių atsirasdavo katodiniams spinduliams išmušus elektronus iš vamzdelio stiklo atomų, o dalį rentgeno spindulių skleisdavo elektronai, staiga stabdomi stiklo.)

Apie 1930 m. švedo B. Edleno (*Edlen*) laboratorijoje buvo pastebėta, kad, šokant kibirkščiai tarp dviejų elektrodų, susidaro daugiakrūviai jonai, pavyzdžiui, alavo garuose – net dvidešimt kartų jonizuoti alavo atomai. Tiriant Saulės vainiko spektrą, kai kurios stebimos linijos atitiko daug kartų jonizuotos geležies spinduliuotę, o tai reiškia, kad Saulės vainiko temperatūra siekia milijoną laipsnių. Tokie daugiakrūvių jonų tyrimai labai svarbūs norint įvaldyti termobranduolinę reakciją. Veikiant medžiagą galingo lazerio spinduliu, galima gauti net urano joną, turintį vieną elektroną, ar išvis tik pliką urano branduolį.

Sužadintas išorinis atomo elektronas gali pereiti į labai tolimą orbitą. Toks atomas pasidaro didesnis net už dulkelę, jo viduje gali skrieti kiti atomai.

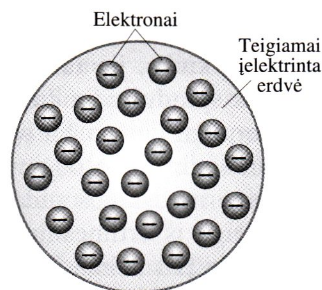
Labai stipriuose elektriniame ir magnetiniame laukuose atomai keičia savo formą, pavyzdžiui, atomas pasidaro panašus į ilgą adatą.

Paminėjome vos kelis įdomesnius atomo fizikos reiškinius, bet jų šių dienų fizikams yra žinoma kur kas daugiau. Taigi atomo fizika yra be galo plati mokslo sritis, kupina įdomybių ir netikėtų jų taikymo galimybių.

## 137. Atomo sandara. Rezerfordo bandymai

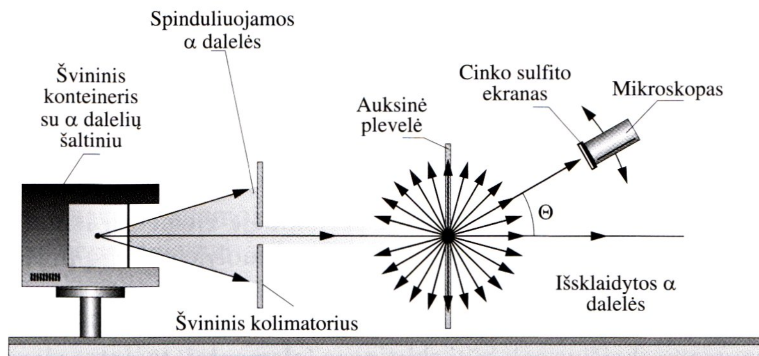
Iki 1902 m. buvo atlikta gana daug eksperimentų, įtikinamai įrodžiusių, kad **elektrònas – viena iš pagrindinių bet kokios medžiagos sudėtinių dalių**. Dž. Tomsonas (*Thomson*), remdamasis klasikine elektromagnetine teorija, apskaičiavo, kad elektrono matmenys turi būti $10^{-13}$ cm eilės. Be to, jau XIX amžiaus kinetinė teorija įrodė, kad atomų matmenys yra kelių *angstrèmų* eilės (1 Å = $10^{-8}$ cm). Todėl Tomsonas padarė išvadą, jog atomo teigiamasis elektros krūvis, reikalingas palaikyti pusiausvyrai su elektronų neigiamuoju krūviu, kad atomas išliktų elektriškai neutralus, turi būti pasiskirstęs po visą atomo tūrį, kurio neužima elektronai. 1906 m. jis pasiūlė atomo modelį, pagal kurį atomo turimų elektronų krūvį neutralizuoja teigiamai įelektrinta aplinka, kurios masė sudaro didžiąją atomo masės dalį (323 pav.). Šis modelis buvo vadinamas „pudingu“, nes elektronai buvo išbarstyti teigiamai įelektrintoje aplinkoje tarsi razinos pudinge.

Nors Tomsono modelis ir atrodė viliojantis, nes numatė elektroninę atomo struktūrą, bet išsilaikė tik iki 1911 m. Tais metais Ernestas Rezerfordas (*Rutherford*; 1871–1937) įrodė, kad teigiamasis elektros krūvis nėra pasiskirstęs po visą atomą, o sukoncentruotas nepaprastai mažame jo tūryje – atomo branduolyje.



323 pav.

Iš pradžių dirbęs Makhilo universitete Kanadoje, 1907 m. Rezerfordas persikėlė į Mančesterį, kur nuodugniai ištyrė neseniai atrastą radioaktyviųjų medžiagų spinduliavimą. Jį ypač domino spinduliuotė, kurią sudarė teigiamojo krūvio dalelės, – vadinamieji $\alpha$ spinduliai, arba $\alpha$ dalelės. 1908 m. Rezerfordas padarė galutinę išvadą, kad $\alpha$ spinduliai – tai helio atomai, kurių krūvis lygus $+2e$.



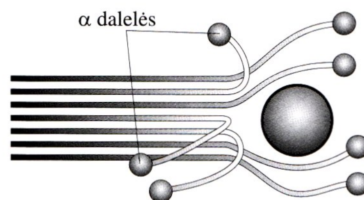

324 pav.

Atvykęs į Mančesterį, Rezerfordas pradėjo sistemingai tirti, kaip medžiaga išskaido α daleles, ir pastebėjo, jog kiekviena jų, atsimušusi į cinko sulfito ekraną, sukelia blyksnį. 324 paveiksle schemiškai pavaizduotas jo sukonstruotas prietaisas α dalelių sklaidai tirti. Švininis kolimatorius iš radioaktyvaus šaltinio išskirdavo siaurą α dalelių pluoštelį. Po to jos, išsklaidytos auksinės plėvelės, atsimušdavo į ekraną, pagamintą iš cinko sulfito. Jas registravo nedideliu mikroskopu, pagal šviesos blyksnius. Sukant detektorių, buvo galima išmatuoti santykinį α dalelių, išsklaidytų skirtingais kampais Θ, skaičių.

Pagal Tomsono atomo modelį α dalelės turėtų laisvai prasiskverbti pro aukso atomus, tik kai kurios truputį nukryptų dėl Kulono jėgų veikimo. Todėl reikėjo laukti, kad, praėjęs pro ploną plėvelę, α dalelių pluoštelis vos vos išsklis, ir vidutiniai sklaidos kampai bus lygūs vos keliems laipsniams. Iš tikrųjų tokia sklaida mažais kampais buvo pastebėta, bet visai netikėtai aptikta, kad maždaug viena dalelė iš 20 000 (plona apie $4 \cdot 10^{-5}$ cm storio plėvelė) sugrąžinama atgal link šaltinio. Ta proga Rezerfordas pasakė: „Iš visko, kas kada nors man yra atsitikę, tai pats keisčiausias įvykis. Tai beveik taip pat neįtikima, kaip kad, šovus 15 colių sviediniu į rūkomojo popieriaus lapą, tikėtis, jog sviedinys atšoks ir pataikys į mus“. Apibendrinęs eksperimento rezultatus, 1911 m. Rezerfordas ir pasiūlė branduolinį atomo modelį.

Susidūrusi su atomu, α dalelė, veikiama atomo elektronų neigiamojo krūvio, turi tik nežymiai nukrypti (kaip Tomsono modelyje), o pagal Rezerfordą α dalelės trajektorija praeina arti branduolio ir stipri elektrinės stūmos jėga gali jos judėjimo kryptį pakeisti iš esmės. Tipiški α dalelių susidūrimo su atomais atvejai parodyti 325 paveiksle.

Matavimai, kuriuos Rezerfordo laboratorijoje kruopščiai atliko Geigeris ir Marsdenas, patvirtino, kad branduolinis Rezerfordo modelis teisingas visais atžvilgiais. Eksperimentų rezultatai ne tik įtikinamai parodė, kad atomai sudaryti iš nepaprastai mažų branduolių ($\approx 10^{-12}$ cm), kuriuos supa elektronai, bet kartu patvirtino, jog Kulono dėsnis galioja ir esant mažiems atstumams.




325 pav.

*Vadinasi, branduolys yra atomo šerdis. Jame sutelkta beveik visa atomo masė, tačiau, palyginus su viso atomo dydžiu, jis yra labai mažas – jo spindulys tesudaro* $\frac{1}{10\,000}$ *atomo spindulio.*

*Atomo branduolys sudarytas iš nukleònų, t. y. protònų ir neutrònų.*

**Protònai ($p$) – tai branduolio dalelės, turinčios teigiamąjį elektros krūvį, kurio dydis lygus elemento atòminiam skaĩčiui periodinėje elementų lentelėje.** Normaliomis sąlygomis (kai atomas nėra sužadintas) branduolyje esančių protonų skaičius $Z$ yra lygus elektronų skaičiui atome, todėl atomai yra elektriškai neutralūs.

**Neutrònai ($n$) – tai krūvio neturinčios branduolio dalelės.** To paties elemento atomuose neutronų skaičius gali būti skirtingas (**elementai, turintys vienodą skaičių protonų, bet skirtingą skaičių neutronų, vadinami izotòpais**). Izotopus turi visi elementai, net jei gamtoje egzistuoja tik viena jų atmaina.

**Mãsės skaĩčius ($A$) – tai bendras branduolį sudarančių protonų ir neutronų (kartu vadinamų nukleonais) masių skaičius. Jis yra artimiausias atomo santykinei atominei masei ir svarbus skiriant izotopus.**

**Atòminis skaĩčius ($Z$) lygus protonų skaičiui branduolyje (taigi ir apie branduolį skriejančių elektronų skaičiui). Visi atomai, kurių atominis skaičius vienodas, yra to paties elemento izotopai.**

Nurodant neutronų skaičių $N$ branduolyje, reikia iš elemento masės skaičiaus $A$ atimti atominį (protonų) skaičių $Z$:

$$N = A - Z. \qquad (305)$$

Pavyzdžiui: anglis žymima $^{12}_{6}C$, jos masės skaičius $A = 12$ rodo, kad branduolys turi 12 nukleonų, iš kurių 6 yra protonai, o 6 – neutronai; natris žymimas $^{23}_{11}Na$, jo masės skaičius $A = 23$ rodo, kad branduolys turi 23 nukleonus, iš kurių 11 yra protonai, o 12 – neutronai.

## Klausimai ir užduotys

**1. Koks yra visas chromo atomo elektronų krūvis?**

**2. Visas atomo branduolio krūvis lygus $2{,}08 \cdot 10^{-18}$ C. Koks tai elementas?**

**3. Nustatykite, kiek protonų ir kiek neutronų yra kalio $^{39}_{19}K$ atomo branduolyje. Kiek elektronų yra kalio elektroniniame apvalkale ir kaip jie išsidėstę orbitose?**

**4. Kiek daugiau neutronų negu protonų yra $^{238}_{92}U$ branduolyje?**

**5. Kokio elemento branduolyje yra: a) 3 protonai ir 4 neutronai; b) 5 protonai ir 6 neutronai?**

**6. Kiek ir kokių nukleonų yra šiuose branduoliuose: $^{1}_{1}H$; $^{27}_{13}Al$; $^{19}_{9}F$; $^{207}_{82}Pb$?**

**7. Kaip vadinamas cheminis elementas, kurio branduolyje yra tokie nukleonai: a) $7p + 7n$; b) $51p + 71n$; c) $101p + 155n$?**

**8. Kokiu mažiausiu atstumu $\alpha$ dalelė, judanti tiese $1{,}9 \cdot 10^{7}$ m/s greičiu, gali priartėti prie nejudančio aukso atomo branduolio, jei žinoma, kad $\alpha$ dalelės masė $6{,}6 \cdot 10^{-27}$ kg, krūvis $3{,}2 \cdot 10^{-19}$ C, aukso branduolio krūvis $1{,}3 \cdot 10^{-17}$ C?**

**9. Kokiu mažiausiu atstumu centrinio smūgio metu $\alpha$ dalelė priartės prie nejudančio alavo branduolio? Žinoma, kad $\alpha$ dalelės greitis lygus $10^{9}$ cm/s, o masė $6{,}7 \cdot 10^{-24}$ g.**

# 138. Boro postulatai. Boro vandenilio atomo modelis

1913 m. danų fizikas N. Boras (*Bohr*) pateikė netikėtą ir drąsų vandenilio atomo spektro analizės rezultatų aiškinimą. Jis priėmė E. Rezerfordo pasiūlytą atomo modelį su centre sukoncentruotu branduoliu ir išorėje skriejančiu elektronu. Remiantis klasikine teorija, sistemą, sudarytą iš masyvaus teigiamąjį krūvį turinčio branduolio ir lengvų neigiamojo krūvio elektronų, galima laikyti stabilia tik tada, kai elektronai nepaliaujamai juda. Taigi atomas turi būti panašus į miniatiūrinę Saulės sistemą, kurioje Saulės vaidmuo tenka branduoliui, o planetų – elektronams. Toji analogija būtų tinkama (juk tiek elektrinės, tiek gravitacijos jėgos proporcingos $\frac{1}{r^2}$), jei ne vienas klasikinės teorijos teiginių. Anot jo, su pagreičiu judantys elektros krūviai turi spinduliuoti energiją elektromagnetinėmis bangomis. Dėl to, judėdami „planetų“ orbitomis ir spinduliuodami energiją, elektronai turėtų sparčiai artėti prie branduolio. Remiantis klasikine elektromagnetine teorija, apskaičiuota, kad vandenilio atomo elektronas turėtų visą savo energiją išspinduliuoti per mažą sekundės dalį. Bet iš tikrųjų taip su atomu neatsitinka – tai kur klasikiniame modelyje klaida?

Drąsios N. Boro prielaidos esmė yra ta, kad klasikinės elektromagnetinės teorijos negalima taip paprastai taikyti elektronui, judančiam orbita aplink branduolį. Taigi N. Boras pasiūlė savo suformuluotus postulatus.

Pagal pirmąjį Boro postulatą elektronas gali būti tik tokiose orbitose, kuriose judesio kiekio modulio $mv$ ir orbitos spindulio $r$ sandauga yra kartotinė dydžiui $\frac{h}{2\pi}$ (čia $h$ – Planko konstanta, arba universalioji fizikinė konstanta, lygi energijos ir laiko, mechanikoje vadinamo veikimu, sandaugai. Kadangi dydis $h$ yra tarsi elementarusis veikimo kiekis, **Planko konstanta vadinama veikìmo kvántu (porcija)**. Veikimo kvanto sąvokos įtraukimas į fiziką davė akstiną sukurti svarbiausią XX a. fizikos teoriją – kvantinę teoriją. Šis veikimo kvantas labai mažas ir lygus $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Js. Kol elektronas yra vienoje iš tokių orbitų, energija nespinduliuojama. **Kiekvieną elektrono orbitą atitinka tam tikra energija arba tam tikra atomo enèrginė bū́sena, vadinama stacionarių̃ja. Stacionariosios būsenos atomas nespinduliuoja šviesos.** Pirmąjį Boro postulatą užrašome taip:

$$mvr = n\frac{h}{2\pi}; \qquad (306)$$

čia $n = 1, 2, 3, \ldots$ – tam tikras sveikasis skaičius, vadinamas *pagrindiniù kvántiniu skaĩčiumi* (tai ir yra kvantavimo taisyklė). 306 lygtyje narį $\frac{h}{2\pi}$ pažymėję $\hbar$ (tariama: ha su brūkšneliu), pastarąją lygtį perrašome kitu pavidalu:

$$mvr = n\hbar. \qquad (307)$$

Antrasis Boro postulatas teigia, kad **atomas absorbuoja arba išspinduliuoja šviesos kvantą tik peršokdamas iš vienos stacionariosios būsenos į kitą. Be to, energija absorbuojama arba spinduliuojama tam tikromis porcijomis, kvantais,**

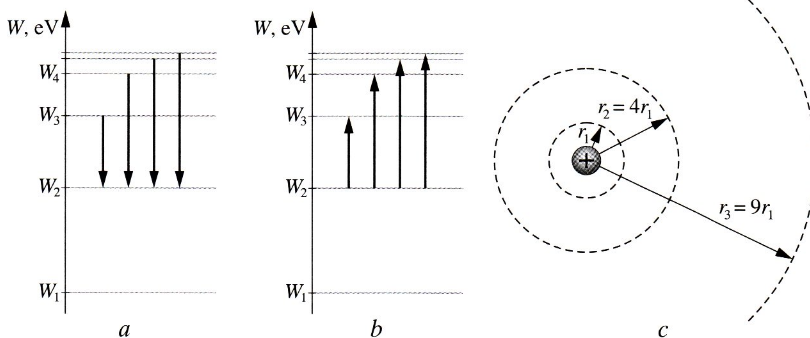
**kurių vertė $hf$ lygi skirtumui energijų, atitinkančių pradinę bei galinę atomo stacionariąją būseną:**

$$hf_{k,n} = |W_k - W_n|; \qquad (308)$$

čia $k$ ir $n$ – stacionariųjų būsenų numeriai, $W_k$ – pradinės atomo būsenos energija, $W_n$ – galinės jo būsenos energija, $f$ – atomo išspinduliuotos arba absorbuotos šviesos dažnis.

Kai $W_k > W_n$, tai atomas elektromagnetinių bangų pavidalu išspinduliuoja energiją, ir elektronai iš aukštesnių atomo energinių lygmenų grįžta į žemesnius, o kai $W_k < W_n$ – atomas absorbuoja energiją ir jo elektronai pereina į aukštesnius energinius lygmenis.

Vadinasi, pagal Boro teoriją elektrono trajektorija atome negali keistis tolydžiai, jis gali tik „peršokti“ iš vienos stacionariosios orbitos į kitą. Peršokdamas iš toliau nuo branduolio esančios stacionariosios orbitos (didesnės energijos būsenos) į artimesniąją (mažesnės energijos būseną), atomas spinduliuoja šviesą (326 pav., a).




326 pav.

Atomas absorbuoja energiją, pereidamas iš mažesnės energijos būsenos į didesnės energijos būseną (326 pav., b).

Kad geriau suprastume energijos pasiskirstymą ir leistinas elektrono orbitas atome, remdamiesi N. Boro samprotavimais vandenilio atomui, išveskime energijos ir elektrono orbitos spindulio apskaičiavimo atome formules.

Tarkime, kad elektronas vandenilio atome juda apskritimine orbita, todėl jo ir branduolio sąveikos potencinę energiją galime užrašyti lygtimi $W_p = -\dfrac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$, kurioje $e$ – elektrono krūvio modulis, $\varepsilon_0$ – elektrinė konstanta, $r$ – atstumas nuo elektrono iki branduolio, „–“ ženklas parodo, kad potencinė energija yra neigiama, kadangi veikiančios viena kitą dalelės (elektronas ir protonas, sudarantys vandenilio branduolį) turi skirtingo ženklo krūvius.

Taikydami Niutono mechanikos dėsnius, pilnutinę atomo energiją apibūdiname kinetinės ir potencinės energijos suma: $W = \dfrac{mv^2}{2} - \dfrac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$.

Remdamiesi antruoju Niutono dėsniu, galime teigti, jog elektronas orbitoje juda normaliniu pagreičiu, kurį jam suteikia kulono jėga: $ma_{\text{įc}} = F$ arba

$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$. Atlikę matematinius veiksmus, gauname, kad $mv^2 r = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}$ arba $v^2 = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 mr}$. Į pilnutinės atomo energijos formulę įrašę elektrono judėjimo atome greičio išraišką, gauname:

$$W = \frac{me^2}{2 \cdot 4\pi\varepsilon_0 mr} - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} = -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r}. \qquad (309)$$

Remiantis klasikine mechanika, elektrono orbitos, o tuo pačiu ir energijos vertės gali būti labai įvairios.

Tuo tarpu pirmasis Boro postulatas teigia, kad energija gali turėti tik tam tikras vertes $W_n$. Todėl iš 309 formulės išplaukia, kad ir elektronų orbitų spinduliai vandenilio atome turi būti apibrėžti.

Šiems prieštaravimams paaiškinti N. Boras įvedė kvantavimo taisyklę, kuri nustato galimų atome elektrono orbitų spindulių ir energijų vertes.

Iš 307 formulės gauname, kad elektrono orbitos spindulys $r = \frac{n\hbar}{mv}$. Į šią išraišką įrašome elektrono greitį orbitoje: $r^2 = \frac{n^2\hbar^2 4\pi\varepsilon_0 mr}{m^2 e^2}$. Matematiškai perdirbę lygtį, ir gauname tokią elektrono orbitos vandenilio atome spindulio išraišką:

$$r = \frac{4\pi\varepsilon_0 n^2\hbar^2}{me^2} \text{ arba } r_n = 4\pi\varepsilon_0 \frac{\hbar^2 n^2}{me^2}. \qquad (310)$$

Iš (310) lygties matyti, kad elektronų orbitų spinduliai kinta diskretiškai ir priklauso nuo pagrindinio kvantinio skaičiaus $n$, $n = 1, 2, 3, 4...$ . Į pastarąją lygtį įrašę elektrinės konstantos $\varepsilon_0$, $\hbar$, elektrono krūvio $e$ ir jo rimties masės skaitines vertes, randame pirmos ($n = 1$) elektrono orbitos vandenilio atome spindulį:

$$r_1 = \frac{4\pi\varepsilon_0\hbar^2}{me^2} = 5 \cdot 10^{-11} m.$$

Būtent toks atomo spindulys ir yra. Tačiau klasikinė teorija negali paaiškinti, kodėl atomo matmenys yra maždaug $10^{-11}$ m eilės.

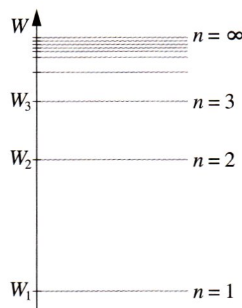
Apibendrindami išsakytas mintis, darome išvadą, kad **pačią artimiausią branduoliui leistiną orbitą atitinka pagrindinis kvantinis skaičius ($n = 1$). Žinodami bandymų būdu gautas dydžių $\varepsilon_0$, $m$, $e$ ir $\hbar$ reikšmes, randame orbitos spindulio vertę: $r_1 = 5 \cdot 10^{-11}$. Šis dydis laikomas vandenilio atomo spinduliu. Bet kurios kitos orbitos spindulys būtų apskaičiuojamas taip: $r_n = r_1 n^2$ (331 pav., c).**

310 išraišką įrašę į pilnutinės atomo energijos formulę (309), galime sužinoti atomo stacionarinių būsenų (lygmenų) energijų vertes: $W = -\frac{e^2 me^2}{8\pi\varepsilon_0 4\pi\varepsilon_0 \hbar^2 n^2}$. Atlikę matematinius veiksmus, gauname, kad

$$W_n = -\frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2}\frac{me^4}{2\hbar^2 n^2}. \qquad (311)$$

327 paveiksle šios energijos vertės atidėtos vertikalioje ašyje. Žemiausios būsenos ($n = 1$) energija atome lygi:

$$W_1 = -\frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2}\frac{me^4}{2\hbar^2} = -2{,}168 \cdot 10^{-18}\ \text{J} = -13{,}55\ \text{eV}.$$



327 pav.

**1 eV energiją įgyja elektronas, judėdamas tarp taškų, kurių potencialų skirtumas lygus vienam voltui.**

1 eV = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J.

Tokiame lygmenyje (būsenoje), kurio energija 13,55 eV, elektronas gali išbūti labai ilgai. Šis lygmuo vadinamas *pagrindiniù* arba *nesužãdintuoju*. Lygmenys arba būsenos, kurių $n = 2, 3, 4, ...$, vadinami *sužãdintaisiais lygmenimis*. Tokios būsenos atomas egzistuoja apytiksliai $10^{-8}$ s. Per tą laiką elektronas maždaug $10^8$ kartų apskrieja aplink branduolį.

Norint vandenilio atomą jonizuoti (atplėšti nuo jo elektroną), jam reikia suteikti 13,55 eV energijos, kuri vadinama jonizacijos energija.

Kai elektronas yra n-tojoje orbitoje (lygmenyje), tai jo būsenos energija lygi $W_n = \frac{W_1}{n^2}$ (žr. 327 pav.).

## Klausimai ir užduotys

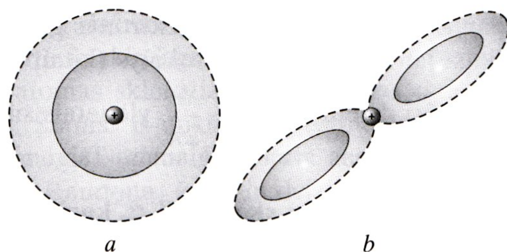
**1. Vykstant išlydžiui vamzdelyje su kriptonu $^{86}_{36}$Kr, spinduliuojami šviesos kvantai ir atomai pereina į kitą būseną, kurios energija skiriasi $3{,}278 \cdot 10^{-19}$ J. Koks yra skleidžiamų spindulių bangos ilgis?**

**2. Kiek kartų vandenilio atomo elektrono, skriejančio pirmąja Boro orbita ($r = 0{,}53 \cdot 10^{-10}$ m), greitis yra didesnis už lėktuvo greitį $v = 800$ m/s?**

# 139. Kvantiniai skaičiai – elektrono adresas atome

Boro teorijoje daroma prielaida, kad elektronų orbitos yra apskritimai. Šios teorijos rezultatai buvo pakankamai geri tik nagrinėjant patį paprasčiausią – vandenilio – atomą. Tačiau, kai remiantis ja buvo siekiama apskaičiuoti helio atomo spinduliavimą, teisingų kiekybinių rezultatų nebuvo gauta. Tam tikras žingsnis pirmyn buvo planetinis atomo modelis. Pagal jį elektronai, kaip ir Saulės sistemos planetos, juda elipsinėmis orbitomis, kurių viename židinyje yra branduolys. Tačiau ir šis modelis turėjo trūkumų, nes, juo remiantis, nebuvo galima atsakyti į daugelį klausimų.

Neįmanoma nustatyti, kaip elektronas juda atome. Makropasaulyje nėra tokio judėjimo analogų. Negalime ne tik pasekti elektrono judėjimo trajektorijos, bet ir nustatyti jo padėties bet kuriuo momentu. Elektrono judėjimo atome trajektorijos, arba orbitos, sąvoka neturi fizikinės prasmės. Negalima nustatyti, kada elektronas pasirodys įvairiuose erdvės taškuose; jis yra tarsi „išplitęs“ tam tikroje srityje, vadinamoje *elektrònų debesimì*. Pavyzdžiui, nesužadinto vandenilio atomo elektronų



328 pav.

debesis yra nevienodo tankio ir rutulio formos. Didžiausia tikimybė rasti elektroną arti sferos, kurios spindulys $r_1$, atitinka pirmosios Boro orbitos spindulį. Toliau yra didžiausia tikimybė rasti elektroną arba, kitaip tariant, erdvės sritį, kurioje elektronų debesies tankis didžiausias.

Tik nesužadintosios būsenos vandenilio atomo (pagrindinis kvantinis skaičius $n = 1$) elektronų debesis bus visada sferiškas (328 pav. *a*). Kai $n = 2$, elektronų debesis, be sferinės formos, kurios matmenys dabar būtų keturis kartus didesni, gali įgyti ir savotiško svarmens formą (328 pav., *b*). Elektrono debesies nesferiškumą apibūdina antrasis kvantinis skaičius $l$, vadinamas *orbìtiniu kvántiniu skaĩčiumi*.

**Kiekvieną pagrindinio skaičiaus $n$ vertę atitinka teigiamos kvantinio skaičiaus $l$ vertės nuo nulio iki $(n - 1)$: $l = 0, 1, 2, ..., (n - 1)$.**

Pvz., kai $n = 1$, $l$ turi vienintelę vertę, lygią nuliui, ir galima tik sferinė orbita. Kai $n = 2$, galima tiek sferinė, tiek svarmens formos orbita, todėl ir $l$ gali būti lygus nuliui arba vienetui.

Kai $n = 3$, tai $l = 0, 1, 2$. Elektronų debesis, atitinkantis vertę $l = 2$, yra gana sudėtingas. Tačiau mums svarbu ne jo forma, o tai, kokia atomo energija atitinka tą debesį.

**Vandenilio atomo energija priklauso tik nuo pagrindinio kvantinio skaičiaus $n$ vertės ir nepriklauso nuo orbitinio kvantinio skaičiaus $l$ vertės.** Kitaip tariant, kai $n = 3$, atomas turi tam tikrą energiją $E_3$. Ji nepriklauso nuo to, kurioje iš galimų $n$ vertę ir įvairias galimas $l$ vertes atitinkančių orbitų yra elektronas. Vadinasi, grįždamas iš sužadintojo lygmens į pagrindinį lygmenį, atomas spinduliuos fotonus, kurių energija nepriklauso nuo $l$ vertės.

**Elektronų debesies padėtį erdvėje tam tikru būdu parinktos krypties atžvilgiu nusako magnetinis kvantinis skaičius $m$, kuris gali įgyti sveikąsias vertes nuo $-l$ iki $+l$ ir nulį:** $m = -l, -(l - 1), ...,-1, 0, +1, ..., m(l + 1), +l$.

Tam tikros formos elektronų debesis erdvėje gali būti orientuotas įvairiais būdais. Kai $l = 1$, gali būti trys skirtingi orientacijos būdai, atitinkantys magnetinio kvantinio skaičiaus $m$ vertes: $m = -1, 0, +1$. Kai $l = 2$, elektronų debesies skirtingų orientacijos būdų yra 5 ir jie atitinka vertes $m = -2, -1, 0, +1, +2$. Savaime aišku, jeigu laisvojo vandenilio atomo elektronų debesies forma neturi įtakos atomo energijai, tai šio debesies orientacija erdvėje tuo labiau neturės jai įtakos.

Detaliau išnagrinėjus eksperimentinius duomenis, paaiškėjo, kad orbitose patys elektronai gali būti dvejopos būsenos, kurią nulemia vadinamojo *elektròno sùkinio* kryptis.

Kas gi yra tas elektrono sukinys?

1925 m. anglų fizikai Dž. Ulenbekas (*Uhlenbeck*) ir S. Gaudsmitas (*Goudsmit*) pasiūlė hipotezę kai kurių elementų optinių spektrų linijų smulkiajai sandarai aiškinti. Pagal ją kiekvienas elektronas sukasi apie savo ašį, panašiai kaip vilkelis arba verpstė. Šitaip sukdamasis jis įgyja tam tikrą judesio kiekio momentą, kuris ir vadi-

namas sukiniu. Kadangi elektronas gali suktis laikrodžio rodyklės kryptimi ir priešinga jai kryptimi, tai ir sukinys (kitaip tariant, judesio kiekio momento vektorius) gali būti dviejų krypčių. $\frac{h}{2\pi}$ vienetais sukinys lygus $\frac{1}{2}$, o dėl skirtingų krypčių gali būti teigiamas arba neigiamas. Taigi **elektrono orientacija orbitoje apibūdinama sukinio kvantiniu skaičiumi σ, kuris yra lygus** $\pm\frac{1}{2}$. Reikia pasakyti, kad sukinio, kaip ir elektrono, orbitos orientacija neturi įtakos laisvojo vandenilio atomo energijai.

Sukinys yra tam tikra neatskiriama elektrono savybė, tokia, pavyzdžiui, kaip jo masė bei krūvis.

Šiais laikais, remiantis kvantine mechanika, galima atsakyti į kiekvieną klausimą, susijusį su atomo sandara ir elektronų apvalkalų savybėmis. Tačiau apskritai ši teorija yra gana sudėtinga ir čia jos nenagrinėsime. Kokybinis atomų apvalkalų aprašymas pateikiamas chemijos kurse.

## Klausimai ir užduotys

**1. Užpildykite lentelę:**

| **Kvantiniai skaičiai** | | | | **Posluoksnio lygmens žymėjimas** | **Orbitų skaičius posluoksnyje** | **Elektronų skaičius lygmenyje** | **Bendras elektronų skaičius sluoksnyje** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ***n*** | ***l*** | ***m*** | **σ** | | | | |
| 1 | | | | | | | |
| 2 | 0 | 0 | $\pm\frac{1}{2}$ | 2*s* | 1 | 2 | 8 |
| | 1 | –1, 0, +1 | $\pm\frac{1}{2}$ | 2*p* | 3 | 6 | 8 |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |

## 140. Šviesos emisija ir absorbcija

Vandenilio atomo skleidžiamų bangų galimi dažniai apskaičiuojami pagal formulę

$$f_{kn} = \frac{W_k - W_n}{h} = \frac{1me^4}{(4\pi\varepsilon_0)^2\, 4\pi\hbar^3}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right) = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right); \qquad (312)$$

čia $R = \frac{me^4}{(4\pi\varepsilon_0)^2\, 4\pi\hbar^3} \approx 3{,}2 \cdot 10^{15}\ \text{s}^{-1}$ yra pastovus dydis ir vadinamas Rydbergo konstanta.

Visi vandenilio atomo skleidžiamų bangų dažniai sudaro keletą serijų, kurių kiekvieną atitinka tam tikra skaičiaus $n$ vertė ir skirtingos skaičiaus $k > n$ vertės.

Seriją sudaro dažniai bangų, kurias atomas skleidžia, peršokdamas iš aukštesnių energijos lygmenų į vienu žemesnį. Šuoliai iš aukštesnių lygmenų į pirmą sužadintąjį lygmenį (į antrą energijos lygmenį) sudaro Balmerio seriją. 352 paveiksle, *a*, šie šuoliai pažymėti rodyklėmis. Raudona, žalia ir dvi mėlynos linijos regimajame vandenilio spektre atitinka tokius šuolius: $E_3 \rightarrow E_2$, $E_4 \rightarrow E_2$, $E_5 \rightarrow E_2$ ir $E_6 \rightarrow E_2$.

Ši serija pavadinta šveicarų mokytojo J. Balmerio (*Balmer*) vardu. Jis jau 1885 m., remdamasis eksperimentais, nustatė, kad vandenilio regimojo spektro dažniai tenkina sąlygą: $f = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2}\right)$.

*Šviesõs sugėrìmas, arba absòrbcija, yra priešingas spinduliavimui reiškinys.* Sugerdamas šviesą, atomas peršoka iš žemesnių energijos lygmenų į aukštesnius. Atomas sugeria tų pačių dažnių bangas, kurias skleidžia peršokdamas iš aukštesnių energijos būsenų į žemesnes. 352 paveiksle, *b*, rodyklėmis pavaizduoti sugeriančio šviesą atomo šuoliai iš vienų būsenų į kitas.

## Klausimai ir užduotys

**1. Kada atomas energiją: a) sugeria; b) išspinduliuoja?**

**2. Ar gali atomas, pereidamas į sužadintąją būseną, sugerti bet kokią energijos porciją?**

**3. Deguonies atomui jonizuoti reikia 14 eV energijos. Apskaičiuokite spindulių, galinčių sukelti jonizaciją, dažnį.**

**4. Vandenilio atomo elektronas, peršokdamas iš vieno energijos lygmens į kitą, išspinduliavo fotoną, kurio dažnis lygus $4{,}57 \cdot 10^{14}$ Hz. Kiek dėl to sumažėjo atomo energija?**

**5. Kiek kartų pakinta elektrono orbitos spindulys ir energija vandenilio atome, elektronui peršokus iš būsenos, pažymėtos skaičiumi $k = 5$, į būseną, žymimą skaičiumi $n = 1$?**

**6. Vandenilio atomas yra pirmosios stacionariosios būsenos. Apskaičiuokite šio atomo elektrono potencinės bei kinetinės energijos modulių santykį.**

**7. Kiek kartų pakinta vandenilio atomo energija, kai jo elektronas pereina: a) iš pirmosios stacionariosios orbitos į trečiąją; b) iš ketvirtosios orbitos į antrąją?**

**8. Nustatykite elektrinio lauko stiprį ir potencialą vandenilio atomo pirmojoje Boro orbitoje.**

## 141. Lazeriai: pasiekimai ir perspektyvos

Vienas didžiausių antrosios XX a. pusės atradimų – tai kvantiniai elektromagnetinių bangų generatoriai ir stiprintuvai. Dažnai šie prietaisai vadinami *lãzeriais* ir *mãzeriais* (iš angl. k. žodžių *light/microwave amplification* by *stimulated emission of radiation* – šviesos/mikrobangų stiprinimas priverstiniu spinduliavimu –

pirmųjų raidžių). **Šiuose prietaisuose taikomas naujas šviesos spindulio stiprinimo principas – priverstinis atomų ir molekulių elektromagnetinių bangų spinduliavimas**, kurį teoriškai dar 1917 m. nagrinėjo Albertas Einšteinas. Galima sakyti, kad nuo tada prasidėjo lazerių kūrimo istorija. Į šį A. Einšteino darbą ilgai nebuvo kreipiama dėmesio, nes nežinota, kaip sukelti ir panaudoti priverstinį spinduliavimą. Tik 1952 m. tarybiniai mokslininkai Aleksandras Prochorovas ir Nikolajus Basovas bei amerikiečių mokslininkai Čarlis Taunsas (*Townes*), Dž. Gordonas (*Gordon*), H. Caigeris (*Caiger*) pasiūlė konkrečius būdus, kaip panaudoti priverstinį spinduliavimą elektromagnetinėms bangoms generuoti ir stiprinti. Per tolesnius dešimt metų buvo sukurti **mazeriai, kurie veikė centimetrinių bangų diapazone, ir lazeriai, spinduliuojantys šviesos bangas**. 1964 m. už kvantinių generatorių sukūrimą N. Basovui, A. Prochorovui ir Č. Taunsui buvo paskirta Nobelio premija.

Lazerių fizikos srityje sėkmingai dirba Lietuvos mokslininkai. Vilniuje, Fizikos institute, vadovaujant akademikui Jurgiui Viščakui, buvo sukurti pikosekundiniai lazeriai, padedantys spręsti daug naujų mokslo ir praktikos problemų. Kitas mokslinis lazerių tyrimo centras, veikiantis Vilniaus universitete ir vadovaujamas prof. Algio Piskarsko, sėkmingai taiko lazerių fizikos pasiekimus technologijoje, chemijoje, biologijoje ir medicinoje.

Savotiškai įdomi šių prietaisų kūrimo istorija. Kadangi pasiūlytas naujas elektromagnetinių bangų stiprinimo principas buvo neįprastas, be to, atrastas tuo metu egzotiškoje radiospektroskopijoje, tai pramoninės laboratorijos juo menkai domėjosi. Tik 1954 m., Gordonui, Caigeriui ir Taunsui sukūrus pirmąjį veikiantį mazerį, kilo didžiulė susidomėjimo banga. Mazeriai greitai buvo pradėti naudoti ryšių bei lokacijos sistemose ir, kaip labai tikslūs laiko etalonai, – tiksliam laikui nustatyti.

1957 m. Č. Taunsas ir A. Šavlovas sumanė naująjį stiprinimo principą pritaikyti šviesos bangoms. Jų bendradarbiavimas buvo vaisingas ir netrukus buvo sukurtas naujas prietaisas – lazeris. Jis buvo toks nepaprastas, jog tik nedaugelis mokslininkų sugebėjo įvertinti jo galimybes ir taikymo privalumus. Vienos stambiausių JAV firmų „Bell Telephone" patentų skyrius iš pradžių net atsisakė išduoti išradimo pažymą, motyvuodamas tuo, kad prietaisas yra visiškai nenaudingas. Praėjus keleriems metams, ypatingos lazerių savybės buvo deramai įvertintos – juos imta naudoti daugelyje mokslo ir technikos sričių.

Nauji mokslo atradimai kartais ilgai lieka nepritaikyti. Lazerių ir mazerių pavyzdys rodo, kad kartais nesugebama įžvelgti mokslo laimėjimų praktinių taikymo perspektyvų. Vertinant ir planuojant mokslinius tyrimus, pasitaiko apmaudžių klaidų. Štai 1933 m. branduolinės fizikos pradininkas E. Rezerfordas, apibūdindamas šios srities perspektyvas, pasakė: „Energija, išsiskirianti skylant atomui, nepaprastai maža. Kas tikisi, kad šis procesas taps energijos šaltiniu, – šneka niekus". Panašių apsirikimų mokslo ir technikos raidoje būta nemažai. O kartais vienašališkai įvertinama vien praktinė atradimo pusė ir užmirštama paties mokslo, kaip indėlio į bendrą žmonijos kultūrą, pažanga. Mokslo pažangą dažnai lemia ir toks neįtikėtinas veiksnys kaip atsitiktinumas. Šis veiksnys, deja, mažai tepadėjo kuriant mazerius ir lazerius, – juk jie galėjo būti sukurti trisdešimčia metų anksčiau.

Įvertindamas mokslinių tyrimų svarbą ir naudą žmonijai vienas iš lazerių kūrėjų Č. Taunsas suformulavo tokius teiginius:

1. Žinios ir atradimai turi būti taip pat nuoširdžiai gerbiami, kaip ir praktinis jų taikymas.

2. Jeigu norime visiškai išnaudoti žmogaus proto smalsumą, jo norą pažinti, turime pasitikėti talentingų ir sugebančių dirbti mokslininkų intuicija sprendžiant, kas yra įdomu ir vertinga.

3. Jeigu tauta nenori prarasti didžiausių mokslo atradimų, ji turi palaikyti tas mokslo šakas, kurios iš pirmo žvilgsnio atrodo nenaudingos, bet labiausiai stiebiasi į pažinimo saulę.

Šviesos prigimtis ir jos savybės – viena svarbiausių fizikos problemų, sprendžiamų nuo seniausių laikų. Dvidešimtojo amžiaus pradžioje, remiantis M. Planko, N. Boro, A. Einšteino darbais, buvo sukurti šviesos spinduliavimo ir sugėrimo teorijos pagrindai ir įrodyta, kad šviesa yra dvilypės – dalelių ir bangų – prigimties. **Šviesa sklinda vakuume ir skaidriose medžiagose kaip elektromagnetinio lauko virpesiai (bangos), o atomai bei molekulės ją spinduliuoja ir sugeria atskiromis mažytėmis energijos porcijomis, kurias vaizduojame kaip daleles – fotonus.** Danų fizikas Nilsas Boras (*Bohr*), remdamasis įvairių elementų šviesos spektrų tyrimais, įrodė, kad vidiniams atomų procesams nusakyti klasikinės fizikos dėsniai netinka. Jiems taikomi kvantiniai dėsningumai.

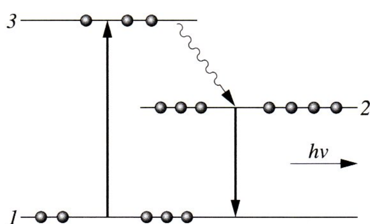
Kaip jau minėjome pereituose paragrafuose, pagal Boro teoriją elektronai atome skrieja aplink branduolį ne bet kokiomis, o tik griežtai apibrėžtomis orbitomis. Tomis orbitomis jie skrieja pastoviai, turėdami tam tikrą energiją, kuri gali pasikeisti tik peršokus iš vienos orbitos į kitą. Tokių šuolių metu išspinduliuojamos arba sugeriamos elektromagnetinės bangos. Jeigu šuolis įvyksta tarp orbitų, kuriose elektronų energija yra atitinkamai $W_1$ ir $W_2$, tai išspinduliuoto arba sugerto fotono dažnis proporcingas šių energijų skirtumui, t. y. $\omega = \frac{W_2 - W_1}{\hbar}$; čia $\hbar$ – Planko konstanta.

Jei bent vienas atomo elektronas skrieja ne ta galima orbita, kuri yra arčiausiai branduolio, tai sakoma, kad atomas yra *sužadintosios būsenos*, arba tiesiog *sužadintas*. Kvantinėje mechanikoje bet kokios sistemos, taigi ir atomo energijos diskretinės vertės vadinamos energijos lygmenimis. Elektronai turi mažiausiai energijos, t. y. atomo energijos lygmuo žemiausias, kai jie skrieja artimiausia branduoliui orbita. Norint elektroną perkelti į vieną iš tolimesnių orbitų, t. y. sužadinti, reikia suteikti jam diskretinę energijos porciją – kvantą. Tai galima padaryti, pavyzdžiui, medžiagą kaitinant arba apšviečiant tam tikro bangos ilgio šviesa. Atomas negali būti sužadintas – jis vėl peršoka į normalią būseną, atitinkančią mažiausią energiją, t. y. peršoka į žemiausią energijos lygmenį. Elektronui grįžtant į ankstesnę orbitą, atomas išspinduliuoja tiek pat energijos, kiek buvo sugėręs. **Atomas gali būti sužadintas nuo $10^{-12}$ s iki kelių sekundžių. Šis laiko intervalas priklauso nuo atomo sandaros ir vadinamas sužãdintosios bū́senos gyvãvimo trukmè.** Kuo mažesnė tikimybė, kad atomas sugrįš į normalią būseną per laiko vienetą, tuo didesnė sužadintosios būsenos gyvavimo trukmė. **Būsenas, kurių gyvavimo trukmė didesnė kaip $10^{-8}$ s, įprasta vadinti metastabiliósiomis.**

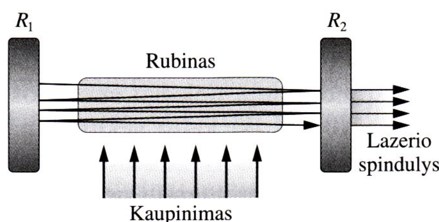
Kai daug atomų būna sužadinti vienu metu ir jų būsenos skirtingos, savaiminis spinduliavimas yra susijęs su elektronų šuoliais iš įvairių lygmenų nepriklausomai vienas nuo kito. Tuomet stebimas įvairiaspalvis ir įvairiakryptis spinduliavimas (pavyzdžiui, taip spinduliuoja šviesą įkaitęs elektros lemputės siūlelis). Toks spinduliavimas vadinamas *nekoherentiniu*.

A. Einšteinas įrodė, kad, be savaiminio, gali būti ir priverstinis atomų spinduliavimas. Tai reiškia, kad sužadintą atomą galima priversti grįžti į normalią būseną anksčiau nei prasidės savaiminis spinduliavimas. Priverstinį spinduliavimą galima sukelti, pavyzdžiui, paveikus sužadintą atomą šviesos kvantu, kuris atitinka sužadintosios ir nesužadintosios būsenų energijos skirtumą. Kiekvieno atomo priverstinis spinduliavimas yra to paties bangos ilgio, fazės ir krypties kaip ir žadinamasis spinduliavimas. Tokį „visai vienodą" daugelio atomų spinduliavimą priimta vadinti *koherentiniu*. Jeigu daug atomų bus tos pačios sužadintosios būsenos, tai ir vienas kvantas galės sukelti jų visų spinduliavimą vienu metu, – šviesa, sklindanti tokia sužadinta (aktyvia) medžiaga, stiprės. Beje, tai tikrai pasiekiama, kai būna sužadinti daugiau nei pusė atomų. Todėl šviesai stiprinti parenkamos tokios medžiagos, kurių atomai lieka sužadinti pakankamai ilgai. Apšvietus galingu (nekoherentiniu) spinduliavimu, gausiai sužadinami jų atomai. Šį procesą vadiname *kaupinimu*. Lazerių technikoje viena iš plačiai vartojamų medžiagų yra rubinas (aliuminio oksidas su chromo jonų priemaiša). Sužadintosios būsenos chromo jonai pavaizduoti 329 paveiksle.

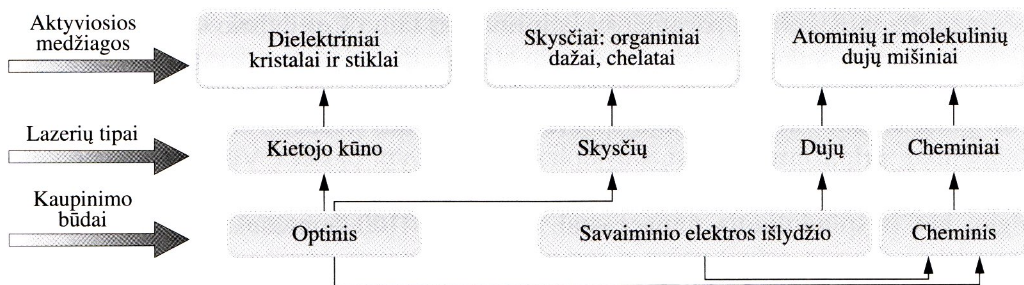
Normalią, nesužadintą chromo būseną atitinka žemiausias energijos lygmuo *1*. Apšvietus rubiną galingos lempos šviesa, chromo jonai sužadinami ir peršoka į lygmenį *3*. Iš čia dalis atomų, savaime spinduliuodami, grįžta į lygmenį *1*, o dalis peršoka į tarpinį lygmenį *2*, atiduodami energiją rubino kristalinei gardelei. Šuolio iš lygmens *3* į lygmenį *2* tikimybė yra 200 kartų didesnė, o iš lygmens *2* į lygmenį *1* – 300 kartų mažesnė, negu iš lygmens *3* į lygmenį *1*. Todėl lygmenyje *2* susikaupia daugiau sužadintųjų atomų, negu jų lieka lygmenyje *1*, ir susidaro sąlygos priverstiniams šuoliams. Tokios būsenos sistema labai nestabili: pirmas savaiminis šuolis sukels kitų atomų šuolius (spinduliavimą) ir prasidės atomų griūtis. Jeigu medžiaga bus tarp lygiagrečių veidrodžių $R_1$ ir $R_2$ (330 pav.), kurių vienas – pusiau skaidrus, tai dalis priverstinio spinduliavimo fotonų išeis pro pusskaidrį veidrodį, o dalis atsispindės ir sukels kitų sužadintųjų atomų spinduliavimą. Lazerinis spinduliavimas stiprės tol, kol sužadintieji atomai „išsikraus". O jeigu sužadintųjų atomų skaičius bus pastovus (visą laiką galinga lempa veikiant rubiną), už pusskaidrio veidrodžio matysime nenutrūkstamą raudonos spalvos spindulį.



329 pav.



330 pav.

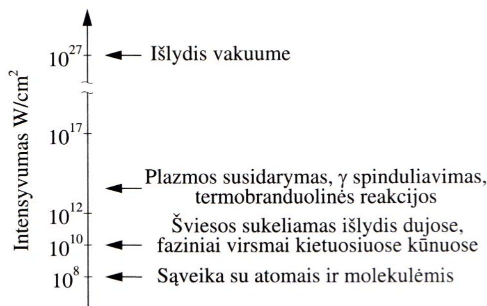



331 pav.

331 paveikse pavaizduotos visos pagrindinės žinomos lazerių rūšys. Čia surašytos aktyviosios lazerių medžiagos ir įvairūs kaupinimo būdai. Pastaruoju metu labiausiai paplitę dujų (He-Ne, argono, anglies dioksido), skysčių (organinių dažų) ir kietojo kūno (neodimio stiklo, granato su neodimiu, rubino, puslaidininkių) lazeriai. Spinduliuojamosios bangos ilgis priklauso nuo atstumo tarp aktyviosios medžiagos atomų ar molekulių „darbinių" energijos lygmenų ir gali būti nuo 0,1 iki 200 mikrometrų, t. y. diapazone nuo vakuuminės ultravioletinės iki tolimos infraraudonosios spinduliuotės. Lazeriai gali spinduliuoti itin trumpus šviesos impulsus, kurių trukmė matuojama femtosekundėmis (viena femtosekundė – $10^{-15}$ s). Pagal lazerių galią praktikoje plačiai taikomi ir mažos galios ($10^{-3}$ W) dujų lazeriai, ir galingi ($10^{6}$–$10^{3}$ W) kietojo kūno lazeriai. Specialiems fizikiniams tyrimams sudaromos lazerių sistemos, kurių galia siekia $10^{14}$–$10^{15}$ W. Lazerio spindulys nepaprastai mažos skleisties, todėl jį galima lęšiais sufokusuoti į mažutėlį ($10^{-4}$ cm$^2$) plotą ir pasiekti intensyvumą, lygų $10^{17}$–$10^{18}$ W/cm$^2$. Tokios stiprios šviesos praktiškai neatlaiko jokia medžiaga – per pikosekundės ($10^{-12}$ s) dalis ji išgaruoja ir virsta plazma.

332 paveikslo schemoje apytiksliai parodyta, kokie reiškiniai vyksta veikiant įvairaus intensyvumo šviesai. Įdomiausia sritis – kai intensyvumas didesnis negu $10^{20}$ W/cm$^2$ (praktiškai tai dar nepasiekta). Čia šviesa turėtų sąveikauti su branduolio elementariosiomis dalelėmis. Teoriškai įrodyta, kad šviesos, kurios intensyvumas $10^{27}$ W/cm$^2$, neatlaikytų net vakuumas – įvyktų išlydis.

Tarp įvairiausios paskirties ir konstrukcijos lazerių vertėtų atkreipti dėmesį į derinamuosius lazerius. Lazerio spinduliuojamos šviesos spalva, kaip žinome, priklauso nuo to, kiek „nukrinta" elektronas, peršokdamas iš lygmens į lygmenį. Kadangi atomo energijos lygmenys griežtai apibrėžti, tai ir lazeris spinduliuoja tik tam tikro bangos ilgio (spalvos) šviesą.




332 pav.

1965 m. S. Achmanovui, R. Chochlovui ir A. Piskarskui pavyko sukurti naują lazerį, kurio spinduliuojamos šviesos spalvą galima tolydžiai keisti. Toks prietaisas buvo pavadintas parametriniu lazeriu ir dabar plačiai taikomas praktikoje. Parametriniu šis lazeris vadinamas todėl, kad, keičiant virpančius sistemos (elektrono

atome arba molekulėje) parametrus, stiprinamas tam tikro dažnio virpesys. Bangos ilgis derinamas sukant aktyvųjį kristalą arba keičiant jo temperatūrą. Tiesa, yra rasta ir kitų būdų lazerių šviesos spalvai tolydžiai keisti, bet parametriniai lazeriai itin gerai veikia infraraudonojo spektro srityje. Juos kurdami ir taikydami, žymių laimėjimų, pripažintų ir mūsų šalyje, ir užsienyje, yra pasiekę Vilniaus universiteto fizikai. Jų sukurti parametriniai lazeriai yra ne tik tolydžiai keičiamo šviesos bangos ilgio, bet ir spinduliuoja nepaprastai trumpus – 100 femtosekundžių trukmės – impulsus.

Pastaruoju metu fizikai kuria naujų bangų ilgių – rentgeno ir γ – lazerius. Iš tikrųjų, trumpiausio bangos ilgio (apie 400 Å) koherentinis spinduliavimas anksčiau buvo žadinamas keičiant ultravioletinį arba infraraudonąjį lazerių spinduliavimą dujų mišiniuose. Tačiau tokiu būdu sukeltas spinduliavimas yra mažos galios ir nesiekia trumpesnių bangų srities. Todėl fizikai ieško būdų, kaip tiesiogiai sužadinti rentgeno arba γ spinduliavimą (priminsime, kad rentgeno spindulių bangos ilgis yra nuo dešimčių iki dešimtųjų angstremo dalių, o γ spindulių bangos ilgis – šimtosios ir tūkstantosios angstremo dalys). Atomai ir branduoliai, sužadinti į tuos energijos lygmenis, iš kurių grįždami spinduliuoja rentgeno ir γ kvantus, gyvuoja labai trumpai. Todėl, norint sukaupti daug tokių sužadintųjų atomų ar branduolių, reikia labai galingo kaupiamojo spinduliavimo. Pirmą kartą galingas lazerinis rentgeno spindulys blykstelėjo 1981 m. požeminio branduolinio sprogimo epicentre. Sprogimo sužadintas nekoherentinis rentgeno spinduliavimas kaupino specialaus metalų lydinio strypus, kuriuose ir buvo sužadintas lazerinis rentgeno spinduliavimas. Jo galia siekė $10^{13}$ W. Suprantama, šis lazeris veikė tik kartą. Fizikai suka galvas, kaip tokį branduolinį sprogimą suvaldyti, kad rentgeno lazeris galėtų veikti daug kartų nesuirdamas. O γ lazeris dar nesukurtas. Toliau ieškoma tokių branduolių, kurie sužadinti ilgai išlaikytų metastabiliosios energijos būseną, taigi nereikėtų naudoti didelės kaupinimo galios. Visiškai aišku, kad, sukūrus rentgeno ir γ lazerius, atomo ir branduolio fizikoje įvyks ne mažesnis perversmas kaip ir sukūrus elementariųjų dalelių greitintuvus.

Viena iš jauniausių ir svarbiausių šio šimtmečio fizikos sričių, kurioje audringą plėtrą skatina lazeriai, – tai labai sparčių vyksmų atomuose ir molekulėse tyrimai.

Optikoje vyksmas laikomas labai sparčiu, jei jis trunka maždaug dešimtis pikosekundžių. Branduolio fizikai žino ir spartesnių procesų. Taigi kas gali nutikti atomui ar molekulei per vieną pikosekundę? **Per tiek laiko (1 ps) sužadinti atomai gali išspinduliuoti energijos perteklių ir sugrįžti į žemiausią energijos lygmenį; sužadinta molekulė savo energijos perteklių atiduoti kitoms gretimoms molekulėms; molekulės branduolių virpesių energija gali virsti šilumine arba, jei virpesiai labai stiprūs, molekulė gali suskilti. Tokių labai sparčių energijos perdavimo ir išsklaidymo vyksmų yra gana daug. Jų tuo daugiau ir jie tuo spartesni, kuo sudėtingesnė molekulė ar molekulių junginys**. Pavyzdžiui, labai įdomūs ir sudėtingi energijos mainai ir virsmai stebimi augalų ir gyvūnų ląstelėse, vykstant pirminėms su gyvybine veikla susijusioms reakcijoms.

Itin spartūs vyksmai tyrinėjami įvairiais metodais, bet visi jie panašūs. Pirmiausia tiriamajam objektui suteikiamas trumpas energijos impulsas: pavyzdžiui, kietasis kūnas arba biologinė ląstelė apšvitinami trumpu elektronų, rentgeno spin-

dulių arba šviesos impulsu. Po to optiniais, elektriniais, mechaniniais ar cheminiais būdais tiriama (zonduojama), kaip pakinta objekto savybės, parametrai. Šis metodas vadinamas „smūginiu“. Taip stebimas vandens paviršiuje susidariusių bangų, įmetus akmenį, gesimas. Šiuo būdu tyrinėjami ir labai spartūs vyksmai biologiniuose objektuose – ląstelėse, molekulių junginiuose, paveikus juos trumpu lazerio šviesos impulsu. Pirmą mūsų šalyje pikosekundinį lazerinį spektrometrą 1976 m. suprojektavo ir pagamino Vilniaus universiteto fizikai.

Paminėsime dar vieną, sprendžiamą taip pat ir mūsų fizikų, atrankiojo lazerio spinduliuotės poveikio molekulėms problemą. Jos esmė štai kokia: parinkus pakankamai trumpą, galingą ir reikiamo bangos ilgio šviesos impulsą, galima taip paveikti sudėtingą molekulę, kad ji suskiltų, ir ne bet kaip – nutrūktų tam tikras norimas cheminis ryšys. Taip būtų galima valdyti chemines reakcijas, netgi kryptingai keisti genetinį kodą. Praktiškai tai įvykdyti labai sunku, nes sudėtingoje molekulėje gauta žadinimo energija akimirksniu (greičiau nei per vieną pikosekundę) „pasiskirsto“ – virsta įvairių virpesių energija, ir molekulė skyla ne toje vietoje, kur mums reikia, o ten, kur silpniausias jos ryšys. Todėl šiai idėjai įgyvendinti reikia labai galingų (10 GW ir daugiau) derinamo bangos ilgio infraraudonosios šviesos impulsų, trunkančių trumpiau nei 100 femtosekundžių. Tokius lazerius neseniai sukūrė Vilniaus universiteto fizikai, vadovaujami A. Piskarsko.

Lazerio spinduliu galima matuoti atstumą ir greitį. Pavyzdžiui, lazeriu buvo išmatuotas atstumas tarp Žemės ir Mėnulio. Tuo tikslu lazerio spindulys buvo nusiųstas į Mėnulį, kur jis atsispindėjo nuo specialaus veidrodžio (pastatyto „Apolono“ astronautų) ir grįžo į Žemę.

Meteorologai lazeriais tiria ir skaidrių oro sluoksnių, ir debesų judėjimą, taip pat oro užterštumą.

Lazerio spindulys naudojamas medicinoje ir pramonėje. Nedidelės galios lazerio spindulys, sufokusuotas į akies tinklainę, be skausmo pritvirtina („suvirina“) atitrūkusią tinklainės dalį ir grąžina regėjimą. Lazeriu galima pašalinti visokias odos ataugas ir be skausmo gręžti skaudamą dantį. Pramonėje lazeriais pjaustomi metalo lakštai ir ruošiniai, gręžiamos skylės deimantuose, suvirinamos mikroelektroninių schemų dalys.

Lazeriu palaikomas ryšys, nes šviesos spinduliais galima perduoti daug daugiau informacijos nei radijo bangomis. Informaciją, garsą ir vaizdą galima perduoti šviesos spinduliu, kuris sklinda specialiais šviesolaidžiais, todėl sumažėja galios nuostoliai, atsirandantys, kai šviesa sklinda pro rūką ar atmosferos debesis.

Viena įdomiausių lazerio koherentinės šviesos taikymo sričių yra *hologrãfija*, kuria gaunami trimačiai (erdviniai) atvaizdai. Ateities perspektyva – holografinė (erdvinė) televizija ir kinas. Jau dabar holografija daug kur taikoma. Dvigubos ekspozicijos *hologrãmose* įrašomas bet kuris tarpinis daikto judesys tarp šių ekspozicijų, todėl iš įrašo atgaminamas įvairių paviršių virpesių vaizdas. Vibracijų analizė padeda kurti patvarias ir patikimai veikiančias lėktuvų ir variklių dalis, kai greičiai ir apkrovos yra dideli. Lazeris gali padaryti perversmą ir branduolinėje energetikoje. Dabar tiriama, ar galima lazerio spinduliu sukelti termobranduolines reakcijas (šios reakcijos vyksta vandenilinėje bomboje ir žvaigždėse), iš anksto galingu elektros išlydžiu negavus aukštatemperatūrės plazmos.

# 23 SKYRIUS. ATOMO BRANDUOLIO FIZIKA

## 142. Keturios fundamentinės jėgos

Anot šiuolaikinės fizikos, gamtą valdo keturios pagrindinės, arba fundamentinės, jėgos, arba sąveikos. Visos kitos jėgos yra tų jėgų pasireiškimas. Apibendrinkime žinias apie tas pagrindines jėgas.

**Gravitacijos arba visuotinės traukos jėga** veikia tarp bet kokių dviejų kūnų, turinčių masę. Ji yra labai silpna, palyginti su kitomis jėgomis, kurios veikia tarp mikrodalelių (elementariųjų dalelių, atomų, molekulių) ir net tarp mus supančių kūnų, tačiau tampa labai stipria, pagrindine jėga tarp kosminių kūnų, turinčių milžiniškas mases. Ši jėga lemia planetų, žvaigždžių, galaktikų ir netgi Visatos evoliuciją.

**Elektromagnètinė jėgà** veikia tarp bet kokių kūnų, turinčių elektros krūvį, taip pat tarp elektros srovių ir magnetų. Ši jėga vyrauja mus supančiame pasaulyje, ji nulemia visa, ką mes girdime, jaučiame, ragaujame, užuodžiame ir matome aplinkui. Pati gyvybė yra elektromagnetinių jėgų rezultatas.

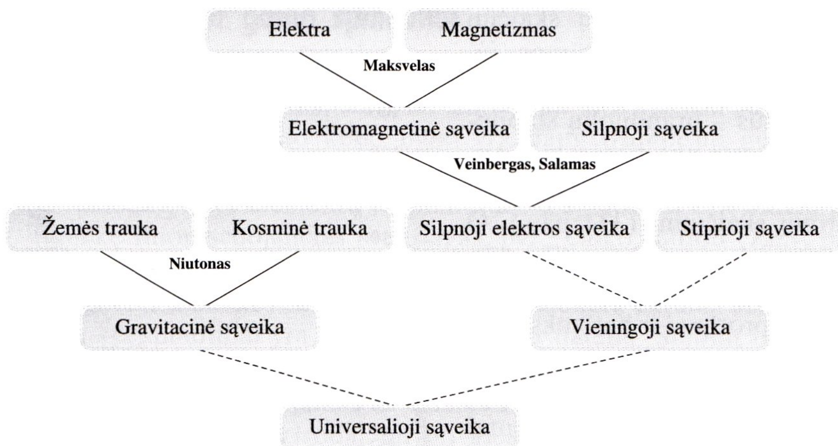
**Stiprióji jėgà (arba stiprioji sąveika)** veikia labai mažais atstumais (apie $10^{-15}$ m) tarp kvarkų bei iš jų sudarytų protonų, neutronų ir kitų elementariųjų dalelių. Ji „suriša" nukleonus į atomų branduolius ir užtikrina jų stabilumą, kol, didėjant protonų skaičiui branduolyje, šios jėgos neįveikia silpnesnė, bet toliasiekė elektromagnetinė jėga. Būtent stiprioji sąveika suteikia galimybę išsiskirti didelėms energijoms branduolinių reakcijų metu.

**Silpnóji jėgà (arba silpnoji sąveika)** veikia daugelį elementariųjų dalelių. Ji pasireiškia dar mažesniais atstumais negu stiprioji sąveika, sukelia kai kuriuos atomų ir elementariųjų dalelių virsmus. Jei nebūtų šios sąveikos, tai neįsižiebtų žvaigždės, nes nevyktų vandenilio virtimo heliu reakcija, o Visatoje būtų paplitę *miujònai*, keistosios ir žavingosios dalelės, kurios suyra dėl silpnosios sąveikos.

Kiekviena iš šių keturių fundamentinių jėgų turi savo svarbią veikimo sritį, jos papildo viena kitą ir visos kartu nulemia pasaulio sandarą ir stebimą reiškinių įvairovę.

Ar gali būti dar nežinomų fundamentinių jėgų? Jų egzistavimas mokslo ištirtoje reiškinių srityje yra beveik neįtikėtinas, nes fizikai, atliekantys matavimus ir skaičiavimus dideliu tikslumu, būtų pastebėję tokių jėgų veikimą ar jų sukeltus reiškinius. Antra vertus, nėra žinoma jokio draudimo egzistuoti kitoms fundamentinėms jėgoms. Tad, skverbiantis į neištirtas sritis, dar gali būti aptikta ir nežinomų jėgų.

Plėtojant fiziką, buvo atrandamos ne tik naujos jėgos, bet ir suvienijamos jau turimos žinios apie jėgas, paaiškėdavo ryšiai tarp jų (333 pav.). I. Niutonas sujungė žemės traukos ir dangaus kūnų jėgas į visuotinę gravitaciją. Dž. Maksvelas įrodė, kad elektros, magnetizmo ir šviesos reiškiniai yra glaudžiai susiję tarpusavyje ir sąlygoti vieno tipo elektromagnetinės jėgos. A. Einšteinas ilgai ir atkakliai bandė įgyvendinti savo idėją – įrodyti, kad visos fundamentinės jėgos turi vieningą prigimtį, tačiau tuo metu buvo atrastos naujos jėgos tarp elementariųjų dalelių ir šios itin sudėtingos problemos sprendimą teko atidėti.




333 pav.

Tik XX a. septintajame dešimtmetyje S. Veinbergui (*Weinberg*) ir A. Salamui (*Salam*) pavyko įrodyti, kad **elektromagnetinė ir silpnoji jėgos yra vienos ir tos pačios jėgos, pavadintos silpnąja elektros jėgà, skirtingi pasireiškimai.** Vieninga jėga būtų stebima esant nepaprastai didelėms sąveikaujančių dalelių energijoms, o mums įprastame pasaulyje silpnoji elektros jėga savaiminiu būdu išsiskiria į dvi skirtingas jėgas. Ši gana sudėtinga teorija susilaukė pripažinimo (beje, ir Nobelio premijų – jos kūrėjams), kai teorijos išvados buvo sėkmingai patvirtintos bandymais.

Dabar mėginama atlikti Didįjį suvienijimą – sujungti silpnąją elektros ir stipriąją jėgas. Jos turėtų supanašėti esant dar didesnėms dalelių energijoms, kai dalelės suartėja ligi $10^{-31}$ m. Iš tos teorijos išplauktų išvada, kad kvarkas gali virsti leptonu, tarpusavyje pasikeisdami elementariąja dalele, kurios masė lygi net $10^{15}$ protono masių, ir atvirkščiai. Deja, aptikti tokią dalelę kol kas nėra jokių vilčių. Lengviau patikrinama kita tos teorijos išvada, kad protonas turėtų būti nestabili, nors ir labai ilgai gyvuojanti dalelė. Kol kas visi bandymai pastebėti protono skilimą nebuvo sėkmingi.

O suvienyti visas keturias fundamentines jėgas yra tolimos ateities tikslas. Jį pasiekus, matyt, paaiškėtų, kodėl pasaulis yra toks, koks jis yra!

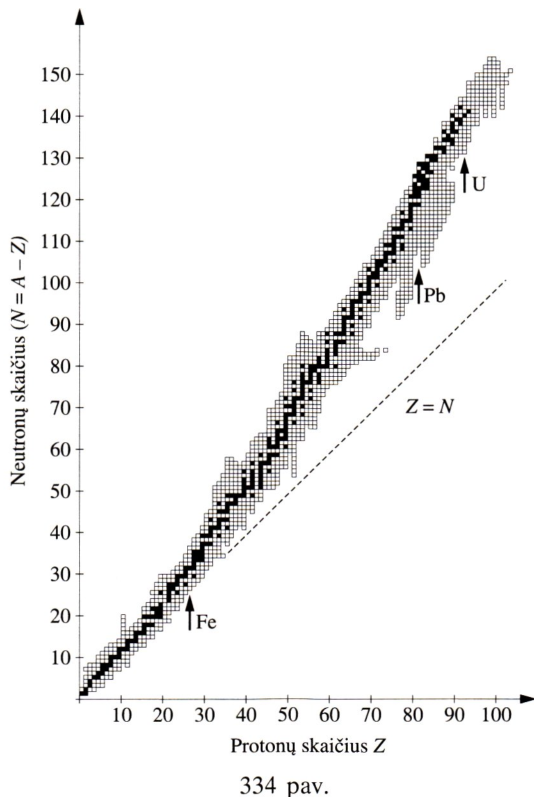
## 143. Radioaktyvumo atradimas

**Radioaktyvùmas – tai reiškinys, kurio metu nestabilieji atomų branduoliai spontaniškai skyla, virsdami kitų elementų branduoliais.**

Šis reiškinys, įrodantis atomo branduolio sudėtinę sandarą, atrastas atsitiktinai.

Branduolį sudarančius nukleonus sujungia stipriosios jėgos, kurios veikia tik artimiausius kaimynus, o protonus vieną nuo kito stumia toliasiekės elektrinės jėgos. Antra vertus, neutronas yra linkęs virsti protonu, turinčiu mažesnę masę, ir nuo to neutroną sulaiko tik protono kaimynystė. Tad **branduoliai būna stabilieji tik tada, kai neutronų skaičius truputį viršija protonų skaičių**. Didėjant elemento eilės

numeriui, taigi ir protonų skaičiui branduolyje, elektrinės stūmos jėgoms įveikti reikia vis didesnio neutronų skaičiaus – branduolių stabilumo takas nutolsta nuo tiesės, kuri atitinka branduolius su vienodu protonų ir neutronų skaičiumi (334 pav.). O elementai, sunkesni už šviną ($Z > 82$), jau nebeturi stabiliųjų izotopų – daugiau kaip 82 protonai ir bet koks skaičius neutronų nesudaro stabiliojo branduolio. Čia baigiasi stabiliųjų elementų seka – visi tolesni elementai turi tik radioaktyviuosius izotopus.




334 pav.

1896 m. H. Bekerelis (*Becquerel*) atrado, kad urano druskos visą laiką spinduliuoja ypatingus spindulius, kurie jonizuoja orą bei kitas dujas, veikia fotografijos plokštelę ir verčia švytėti švytalais padengtus ekranus. Vėliau buvo atrasta daugiau panašiomis savybėmis pasižyminčių medžiagų.

Be Bekerelio, radioaktyvumo reiškinius tyrė Pjeras ir Marija Kiuri (*Curie*). 1898 m. jie išgarsino dviejų naujų labai stiprių radioaktyviųjų elementų – polonio ($_{84}$Po) ir radžio ($_{88}$Ra) druskas ir nustatė svarbiausias naujųjų elementų ypatybes. Tais pat metais buvo atrastas ketvirtasis radioaktyvusis elementas – toris ($_{90}$Th), o 1900 m. – ir penktasis – aktinis ($_{89}$Ac). Vėliau buvo atrasta ir daugiau radioaktyviųjų elementų. Dabartiniu metu yra žinomi 45 natūralūs radioaktyvieji elementai, trumpiau vadinami *radioelemeñtais*.

Paveikta magnetinio lauko, radioaktyviųjų medžiagų spinduliuotė suskyla į tris spindulių pluoštelius; du iš jų nukrypsta magnetiniame lauke į priešingas puses, o trečias lieka vietoje. Taigi radioaktyviąją spinduliuotę sudaro trejopi spinduliai: $\alpha$ (alfa), $\beta$ (beta) ir $\gamma$ (gama).

Radioaktyvieji elementai išspinduliuoja didelius energijos kiekius. Radžio druską įdėjus į kalorimetrą, pastarajame vandens temperatūra laikosi aukštesnė už aplinkos temperatūrą. Nustatyta, kad 1 g radžio kas valandą teikia iki 544 J šilumos, ir toks jo šilumos spinduliavimas vyksta šimtus metų. Iš pradžių buvo manyta, kad yra atrastas neišsemiamas energijos šaltinis. Bet tolesni radioaktyvumo reiškinių tyrimai parodė, kad radioaktyviojo spinduliavimo šaltinis yra atomai, kurie, išlaisvindami didelius energijos kiekius, savaime skyla ir virsta kitų elementų atomais.

Susipažinkime su radioaktyviųjų medžiagų spinduliavimo ypatybėmis.

# 144. Alfa, beta ir gama spinduliai

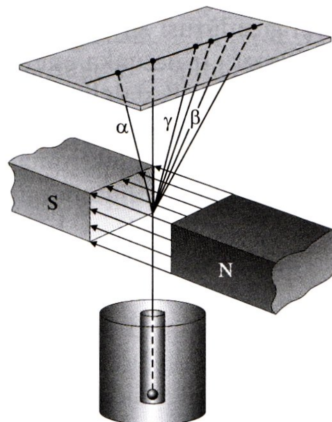
$\alpha$ (alfa) spinduliai praeina tik pro plonesnius (iki 0,1 mm Al arba kelių centimetrų oro) medžiagos sluoksnius; storesni sluoksniai juos visiškai sulaiko. Kietose medžiagose $\alpha$ spindulių nueito kelio ilgiai yra daug trumpesni negu ore, pvz., 0,041 mm storio aliuminio, 0,021 mm sidabro bei 0,014 mm storio aukso folijos sulaiko visų radioaktyviųjų elementų $\alpha$ spindulius. $\alpha$ spinduliai turi didelę jonizacijos galią. Pasiekę fluorescuojančias medžiagas, pvz., cinko sulfidu (ZnS) padengtą ekraną, jie priverčia jas švytėti. Šį švytėjimą sudaro atskiri blykstelėjimai (*scintiliăcijos*), kuriuos sukelia $\alpha$ dalelės smūgiai į švytalais padengtą ekraną. Jis nėra nuolatinis ir rodo, kad $\alpha$ spinduliai yra sudėti iš atskirų $\alpha$ dalelių. Stebint blykstelėjimus, galima suskaičiuoti emituotų į tam tikrą erdvinį kampą $\alpha$ dalelių skaičių. Jei prieš esančią vakuume ir spinduliuojančią $\alpha$ daleles radioaktyviąją medžiagą padėtume sujungtą su elektrometru elektrodą, tai po kiek laiko šis įsielektrintų teigiamai. Taigi $\alpha$ dalelės yra įelektrintos teigiamai.

Eksperimentiškai nustatyta, kad dalelės krūvis $e_\alpha = 3{,}20 \cdot 10^{-19}$ C, t. y. dukart didesnis už elementarųjį elektros krūvį $e$ ($e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ C).

Elektriniame ir magnetiniame laukuose $\alpha$ spinduliai nukrypsta taip, kaip pavaizduota 335 paveiksle. Pagal $\alpha$ spindulių nuokrypį buvo apskaičiuotas jų greitis $v$ ir specifinis krūvis $\frac{e_\alpha}{m}$ (čia $m$ yra $\alpha$ dalelės masė).

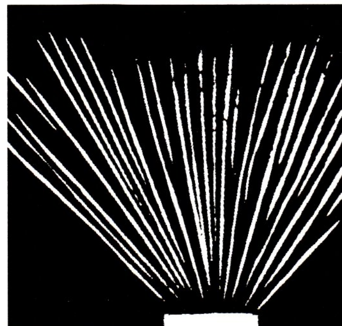
Pasirodė, kad $\alpha$ dalelių specifinis krūvis $\frac{e_\alpha}{m}$ yra du kartus mažesnis už vandenilio jono, taigi jų masė yra 4 kartus didesnė už vandenilio atomo masę. **$\alpha$ dalelė yra dvigubai jonizuotas helio atomas ($He^{2+}$), kitaip tariant, helio atomo branduolys, kurio masė $m_{He} = 6{,}64 \cdot 10^{-24}$ g.** Rezerfordas, įdėjęs radioaktyvią, $\alpha$ daleles spinduliuojančią medžiagą į labai plono stiklo indelį, pastarąjį įkišo į Geislerio vamzdelį ir stebėjo švytėjimo spektrą. Iš pradžių helio spektro linijų visai nebuvo matyti. Jos pasirodė kiek vėliau, nes jas spinduliavo helio jonai.

Ore arba dujose skriejančios $\alpha$ dalelės energija mažėja, kol pagaliau dalelė visai jos netenka, kartu mažėja ir dalelės jonizacijos galia. Šios **dalelės ore arba dujose nuskrietas kelias rodo jos siekiamą tolį, kuris tuo didesnis, kuo didesnė dalelės pradinė energija, taigi ir jos greitis.** $\alpha$ dalelės siekiamas tolis paprastai žymimas $R$, jis išmatuojamas jonizavimo arba kondensavimo (Vilsono) kamerose. Kai jonizavimo kamera esti tiek nutolinama nuo $\alpha$ daleles spinduliuojančios radioaktyviosios medžiagos, kad dalelės visai jos nebepasiekia arba, įlėkusios į ją, nebejonizuoja oro, tai jonizacijos srovė išnyksta. Visos vienos radioaktyviosios medžiagos spinduliuojamos $\alpha$ dalelės nuskrieja ore vienodą kelią. Bet medžiagos mišinio $\alpha$ spindulių pluoštas esti sudėtas iš dalelių, kurių greitis yra nevienodas. Šiuo atveju $\alpha$ spinduliai suskyla į atskirus spindulių pluoštelius, kuriuos sudaro vienodo greičio $\alpha$ dalelės, pasiekiančios tokį pat tolį. Tiriant tokį




335 pav.

spindulių pluoštą Vilsono kamera, kai kamera tolinama nuo radioaktyviosios medžiagos, jonizacijos srovės stipris staigiais šuoliais silpnėja. 336 paveiksle pateiktoje polonio radioaktyviųjų nuosėdų spinduliuojamų α dalelių takų nuotraukoje, padarytoje Vilsono kameroje, matosi, kad dalelių siekiamas tolis yra nevienodas. Apskritai α spindulių energijos spektras rodo, kad α dalelių energija kinta staigiais šuoliais.



336 pav.

**Būdamos sunkios ir lėkdamos dideliu greičiu, radioaktyviųjų elementų spinduliuojamosios α dalelės turi didelės energijos ir yra labai veiklios.** Jos smarkiai aktyvina medžiagas, ardo cheminius junginius. Apšviesti α spinduliais, cheminiai junginiai, pvz., HCl, HBr, HJ, amoniakas, angliarūgštė ir daug organinių junginių, suskyla; baltymai koaguliuoja; metalai, pvz., aliuminis, švinas, gyvsidabris, oksiduojasi. α spindulių paveiktas popierius pasidaro trapus, guma sukietėja, kvarcas ir stiklas subyra į smulkias daleles. Stipresni α spinduliai užmuša choleros, šiltinės ir kt. bakterijas, sustabdo jaunų augalų augimą, sunaikina sėklų daigumą, bet silpni α spinduliai augimą skatina. Ilgiau švitinant kūną α spinduliais, atsiveria sunkiai gyjančios žaizdos.

Susidūrusios su atomų branduoliais, α dalelės gali juos suskaldyti, paversdamos vieną cheminį elementą kitu. Atomų branduoliai pirmiausia ir buvo suskaldyti panaudojus α daleles.

β (beta) spinduliai yra gerokai skvarbesni už α spindulius. Jie pereina net 1 mm storio aliuminio sluoksnį, bet jų jonizacijos galia yra silpnesnė negu α spindulių. β spinduliuotės pluoštas elektriniame ir magnetiniame lauke nukrypsta tokia pat kryptimi, kaip ir katodiniai spinduliai (335 pav.). Tai rodo, kad **β spindulius sudaro neigiamąjį krūvį turinčios elektringosios dalelės**. Pagal jų nuokrypį magnetiniame lauke apskaičiuota, kad β dalelių greitis yra nuo 0,3 ir 0,98 šviesos greičio.

Lėtos β dalelės masė yra beveik lygi elektrono masei, kadangi **β spindulius sudaro greitai skriejantys elektronai**. Ore β dalelės skrieja ne tiese, kaip α dalelė, bet netaisyklinga kreive. Jos masė, palyginus su atomo mase, yra maža, todėl, pakeliui susidūrusi su atomais, ši dalelė nukrypsta įvairiomis kryptimis. β dalelės jonizuoja orą ir netenka energijos. β spinduliuotės energijos spektras yra ištisinis. Spinduliuojamų β dalelių greitis ir energija kinta tolygiai nuo nulinės iki tam tikros didžiausios reikšmės.

Trumpųjų elektromagnetinių bangų (rentgeno bei γ (gama) spindulių) ir elementariųjų dalelių energija išreiškiama elektronvoltais (eV). $1\ \text{eV} = 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ J; $10^6\ \text{eV} = 1\ \text{MeV} = 1{,}60 \cdot 10^{-13}$ J.

Molekulės ir atomai β spindulius smarkiai išbarsto. Susidurdamos su atomais ir molekulėmis, β dalelės juos jonizuoja, išmušdamos elektronus ir taip sužadindamos antrinį β spinduliavimą. Šios antrinės spinduliuotės elektronų, vadinamų δ (delta) dalelėmis, greičiai yra žymiai mažesni. Be to, susiduriant β dalelėms, jų kinetinės energijos dalis paverčiama elektromagnetine energija, kuri išspinduliuojama trumpomis (rentgeno) arba ilgesnėmis (regimosios šviesos) bangomis. β spinduliai sužadina stiklo bei fluorescuojančiųjų medžiagų švytėjimą, jonizuoja kietuo-

sius kūnus (dielektrikus). Kaip ir α spinduliai, jie sužadina kai kurias chemines reakcijas: pvz., geltonasis fosforas, apšviestas β spinduliais, virsta raudonuoju, vandenilis ir chloras susijungia į druskos rūgštį, vanduo suskyla į deguonį ir vandenilį. β spinduliai veikia fotografijos plokštelę, sukelia kai kurių mineralų fluorescenciją. Nušviesti β spinduliais, deimantas, bario platinos cianidas, cinko sulfidas ir kt. švyti stipriai, o akių ragena, lęšiukas ir vandeninis akies skystis švyti silpniau. Fiziologiniai procesai, stipriai paveikti β spindulių, sustoja, o silpnai paveikti – pagreitėja. β spinduliai įsiskverbia į kūną iki keliolikos milimetrų gylio.

**γ spinduliai nenukrypsta nei elektriniame, nei magnetiniame lauke. Todėl jiems, kaip ir rentgeno spinduliams bei regimajai šviesai, buvo priskirta elektromagnetinių bangų prigimtis.** Praleidžiant γ spindulius pro kristalus, buvo išmatuotas bangos ilgis, kuris yra mažesnis už rentgeno spindulių bangų ilgį ir siekia nuo $10^{-9}$ iki $10^{-12}$ cm. Ilgųjų bangų γ spinduliai susilieja su trumpųjų bangų rentgeno spinduliais.

Trumpųjų bangų γ spinduliai pasižymi dideliu skvarbumu. Jie pereina per storus metalo sluoksnius, pvz., pro 10 cm storio švino plokštelę pereina apie 1% ilgesniųjų bangų γ spinduliai, o pačių trumpiausių bangų γ spinduliai tokį švino sluoksnį pereina beveik nesulaikyti. Sklindančių pro medžiagos sluoksnius γ spindulių stipris mažėja, nes medžiagos juos absorbuoja. Eksperimentais nustatyta, kad perėjusių medžiagą γ spindulių stipris priklauso nuo juos absorbuojančios medžiagos prigimties bei tos medžiagos sluoksnio storio. Spindulių sugertį paprastai apibūdiname, nusakydami medžiagos sluoksnio storį, kurį perėję spinduliai *e* kartų susilpnėja.

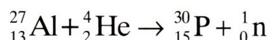
**Sklindančių pro medžiagą γ spindulių silpnėjimą sąlygoja du veiksniai. Pirma, γ spinduliai yra išbarstomi, t. y. nukreipiami nuo pirminės jų sklidimo krypties, antra, jie yra absorbuojami; pastaruoju atveju spinduliuotės energija virsta kitos rūšies, dažniausiai atomų šiluminio judėjimo, energija. Antruoju atveju turime tìkrąją spindulių̃ sùgertį.**

Tyrimai rodo, kad tikroji sugertis priklauso nuo absorbuojamųjų γ spindulių bangos ilgio ir sugeriančio spindulius cheminio elemento eilės numerio periodinėje elementų lentelėje. **Kuo ilgesnių bangų spinduliai eina pro sunkesnį elementą, tuo daugiau jie sugeriami.** Pvz., organizmo kaulai yra sudaryti iš sunkesnių elementų negu raumenys; kauluose yra daug $_{20}Ca$, $_{15}P$, o raumenyse daugiausia – $_{6}C$, $_{7}N$ ir $_{1}H$, todėl kaulai γ spindulius sugeria daug labiau už raumenis. Sugerti γ spinduliai yra labai veiklūs chemiškai, nes atomus ir molekules skaldo į jonus. Be to, giliuose medžiagos sluoksniuose γ spinduliai sukelia β spinduliavimą ir antrinius γ spindulius, kurie savo ruožtu sužadina naujas chemines reakcijas. Šie spinduliai, kaip ir α bei β spinduliai, jonizuoja dujas, bet jų jonizacijos galia yra gerokai mažesnė.

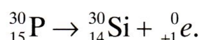
## 145. Dirbtinis radioaktyvumas

Ne iš visų skaldomų elementų atomų sukuriami nauji atomų branduoliai yra stabilūs. Kai kurie iš jų savaime ỹra, kaip ir natūralių radioaktyviųjų elementų branduoliai. Tokiu būdu sukurtą radioaktyvųjį elementą 1934 m. pirmieji atrado Irena Kiuri ir jos vyras F. Žolio-Kiuri (Joliot-Curie). Šie mokslininkai pastebėjo,

kad, apšaudžius aliuminį $\left({}^{27}_{13}\mathrm{Al}\right)$ didelės energijos α dalelėmis, be neutronų, yra išspinduliuojami ir pozitronai. Neutronų spinduliavimas prasideda (bei išnyksta) tuo pat akimirksniu, kai tik pradedama (bei nustojama) aliuminį skaldyti. Pozitronų spinduliavimas prasideda tik praėjus tam tikram, nors ir trumpam, laikui ir trunka dar po to, kai nustojama skaldyti aliuminį α dalelėmis, o vėliau jis ir visai išnyksta. Pozitronų spindulių stipris mažėja pagal tokį patį dėsnį, kaip ir natūralių radioaktyviųjų elementų spinduliavimo stipris. Tai rodo, kad, skaldant ${}^{27}_{13}\mathrm{Al}$ branduolius, sukuriami nauji nestabilūs, radioaktyvieji branduoliai, kurie savaime ỹra, spinduliuodami pozitronus ir virsdami stabiliais branduoliais. Ši branduolių dalijimosi reakcija užrašoma taip:



$${}^{27}_{13}\mathrm{Al}+{}^{4}_{2}\mathrm{He}\rightarrow{}^{30}_{15}\mathrm{P}+{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$



$${}^{30}_{15}\mathrm{P}\rightarrow{}^{30}_{14}\mathrm{Si}+{}^{0}_{+1}e.$$

Taigi, apšaudant aliuminio branduolius α dalelėmis, gaunami fosforo radioaktyviojo izotopo branduoliai ${}^{30}_{15}\mathrm{P}$, kurie irdami virsta ${}^{30}_{14}\mathrm{Si}$ branduoliais. Šis tyrimas parodė, kad, **skaldant atomų branduolius, kartais galima gauti radioaktyvius elementus, kurie vadinami dirbtìniais radioaktyviaĩsiais elemeñtais, o pats reiškinys – dirbtiniù radioaktyvumù.**

Dirbtiniai radioaktyvieji elementai gaunami apšaudant atomų branduolius ne tik α dalelėmis, bet ir deutònais, protonais ir neutronais. Antai, apšaudant ${}^{23}_{11}\mathrm{Na}$ deutonais, gaunamas natrio radioaktyvusis izotopas, kuris, išspinduliuodamas elektroną, ỹra ir virsta magniu: ${}^{23}_{11}\mathrm{Na}+{}^{2}_{1}\mathrm{H}\rightarrow{}^{24}_{11}\mathrm{Na}+{}^{1}_{1}\mathrm{H}$; ${}^{24}_{11}\mathrm{Na}\rightarrow{}^{24}_{12}\mathrm{Mg}+{}^{0}_{-1}e.$

Apšaudant anglies atomus protonais, gaunamas radioaktyvusis azoto izotopas, kuris irdamas virsta anglies izotopu: ${}^{12}_{6}\mathrm{C}+{}^{1}_{1}\mathrm{H}\rightarrow{}^{13}_{7}\mathrm{N}$; ${}^{13}_{7}\mathrm{N}\rightarrow{}^{13}_{6}\mathrm{C}+{}^{0}_{+1}e.$

Apšaudant natrį neutronais, gaunamas radioaktyvusis fluoro izotopas:



$${}^{23}_{11}\mathrm{Na}+{}^{1}_{0}n\rightarrow{}^{20}_{9}\mathrm{F}+{}^{4}_{2}\mathrm{He};\ {}^{20}_{9}\mathrm{F}\rightarrow{}^{20}_{10}\mathrm{Ne}+{}^{0}_{+1}e.$$

Šie keli pavyzdžiai rodo, kad **dirbtiniai radioaktyvieji elementai skyla, išspinduliuodami pozitroną arba elektroną. Natūralių radioaktyviųjų elementų skilimui būdingas α dalelių arba elektronų spinduliavimas.**

**Apšaudant atomų branduolius α dalelėmis bei protonais, gaunami tik lengvesnių elementų radioaktyvieji izotopai. Sunkesnių elementų radioaktyviesiems izotopams gauti reikia atomus veikti didelės energijos deutonais arba neutronais.** Šiuo būdu pavyko dirbtinai sukurti tokius radioaktyviuosius elementus, kurie iki šiol buvo žinomi tik kaip stabilūs bei natūralūs radioaktyvieji elementai arba visai nežinomi, pvz., Np, Pa ir kt. Ypač veiklūs pasirodė lėtieji neutronai.

Šiuo metu gauti beveik visų elementų radioaktyvieji izotopai. Jie gaminami atominiuose reaktoriuose.

Iki pastarųjų metų buvo žinomas penkeriopas radioaktyviųjų elementų skilimas: α, β (elektroninis ir pozitroninis), γ spinduliuotė, savaiminis (spontaninis) branduolių dalijimasis ir pavėluotų neutronų spinduliuotė. Buvo spėjama, kad turėtų būti dar vienas radioaktyviojo skilimo būdas – protoninis ($p$). Taip galėtų skilti branduoliai, kuriuose yra didelis protonų perteklius. Bet sudaryti branduolius su

dideliu neutronų nepritekliumi labai sunku. Be to, tokio proceso metu vyksta žymiai daugiau vadinamųjų fotoninių skilimų, spinduliuojančių $\alpha$ ir $\beta$ daleles bei $\gamma$ spindulius. Todėl reikia labai jautrių matavimo prietaisų, kad tarp įvairių skilimų būtų galima išskirti protoninį skilimą.

Ir vis dėlto 1962 m. Jungtiniame branduolinių tyrimų institute Dubne mokslininkų grupei, vadovaujamai Flerovo, pavyko nugalėti visus sunkumus ir susekti du radioaktyviuosius izotopus, kurie skildami išspinduliuoja protonus.

## 146. Radioaktyviojo skilimo dėsnis. Pusėjimo trukmė

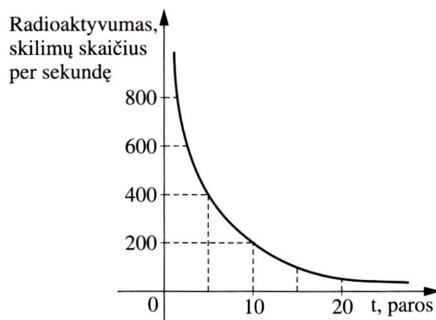
Tirdamas radioaktyviųjų medžiagų virsmus, Rezerfordas bandymais nustatė, kad medžiagų aktyvumas laikui bėgant mažėja. Pasirodo, radono aktyvumas per 1 min susilpnėja perpus. Urano, torio ir radžio aktyvumas laikui bėgant taip pat silpnėja, tik lėčiau. Kiekvieną radioaktyviąją medžiagą apibūdina laiko tarpas, per kurį jos aktyvumas sumažėja perpus. **Laiko tarpas, per kurį suskyla pusė turimų radioaktyviųjų atomų, vadinamas pusėjimo trukmė.** Jis žymimas $T$. Preparato aktyvumas sumažėtų du kartus ir padalijus jį į dvi lygias dalis.

337 paveiksle pavaizduota, kaip, laikui bėgant, mažėja radioaktyviosios medžiagos aktyvumas, t. y. atomų skilimų skaičius per sekundę. Šios medžiagos pusėjimo trukmė lygi 5 paroms.

Išveskime radioaktyviojo skilimo dėsnio matematinę formulę. Tarkime, kad radioaktyviųjų atomų skaičius pradiniu laiko momentu ($t = 0$) lygus $N_0$. Praėjus pusėjimo trukmei, šis skaičius bus lygus $\frac{N_0}{2}$. Dar po vieno tokio laiko tarpo gausime skaičių $\frac{1}{2}\cdot\frac{N_0}{2}=\frac{N_0}{4}=\frac{N_0}{2^2}$.

Praėjus laikui $t = nT$, t. y. praėjus $n$ pusėjimo trukmėms, radioaktyviųjų atomų bus $N = N_0\frac{1}{2^n}$.

Kadangi $n=\frac{t}{T}$, tai



337 pav.

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}. \qquad (313)$$

Tai ir yra pagrindinis radioaktyviojo skilimo dėsnis. Pagal šią formulę randamas nesuskilusių atomų skaičius bet kuriuo laiko momentu.

**Pusėjimo trukmė apibūdina radioaktyviojo skilimo greitį.** *Juo mažesnė pusėjimo trukmė, juo trumpiau gyvuoja atomai, juo greičiau jie suskyla.* Įvairių medžiagų pusėjimo trukmė labai nevienoda. Štai urano $^{238}_{92}U$ pusėjimo trukmė lygi 4,5 mlrd. metų. Kaip tik dėl to urano aktyvumas per keletą metų pastebimai nepakinta. Radžio pusėjimo trukmė gerokai mažesnė – 1600 metų. Todėl radžio aktyvumas daug didesnis už urano aktyvumą.

Yra radioaktyviųjų elementų, kurių pusėjimo trukmė lygi kelioms milijoninėms sekundės dalims.

Norint pagal 313 formulę apskaičiuoti pusėjimo trukmę, reikia žinoti atomų skaičių $N_0$ pradiniu laiko momentu ir nesuskilusių atomų skaičių po tam tikro laiko $t$.

Pagal radioaktyviojo skilimo dėsnį, **per lygius laiko tarpus suskyla tokia pat bet kurio atomų skaičiaus dalis (per pusėjimo trukmę – pusė atomų)**. Vadinasi, **laikui bėgant, skilimo greitis nekinta**. Radioaktyvieji atomai „nesensta". Pavyzdžiui, radono atomai, susidarę po radžio skilimo, turi vienodą galimybę skilti tiek iš karto, tiek ir praėjus 10 minučių po susidarymo. Bet kurio atomo branduolio skilimas – tai ne „mirtis dėl senatvės", o „nelaimingas įvykis". Radioaktyviųjų atomų (tiksliau, branduolių) amžiaus sąvoka neturi prasmės. Galima nustatyti tik vidutinę atomo gyvavimo trukmę $\tau$.

Atskiri atomai gali gyvuoti nuo kelių sekundės dalių iki milijardų metų. Pavyzdžiui, urano atomas gali išgulėti žemėje milijardus metų ir netikėtai suskilti, nors jo kaimynai ir toliau lieka nepakitę. Vidutinė atomo gyvavimo trukmė – tai pakankamai didelio tos rūšies atomų skaičiaus gyvavimo trukmių aritmetinis vidurkis. Ji tiesiog proporcinga pusėjimo trukmei. Nustatyti bet kurio vieno atomo skilimo momentą neįmanoma. Radioaktyviojo skilimo dėsnis aprašo tik vidutinį skaičių atomų, suskylančių per tam tikrą laiko intervalą. Tačiau visada būna nukrypimų nuo vidurkio, ir juo mažesnis preparato atomų skaičius, juo didesni šie nukrypimai. Radioaktyviojo skilimo dėsnis yra statistinis dėsnis. Jis tinka tik dideliems dalelių kiekiams.

## 147. Atomo branduolio sandara. Branduolinės jėgos

Pagal Boro atomo teoriją, atomą sudaro teigiamai įelektrintas didelės masės branduolys ir aplink jį skriejantys elektronai.

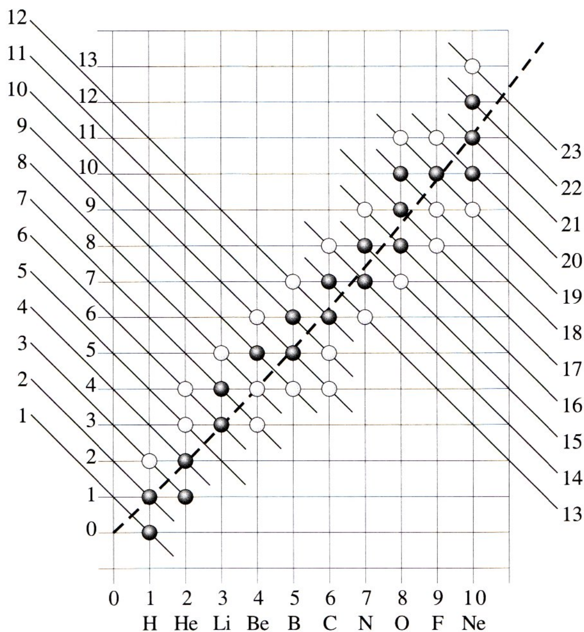
Anot daugelio dujų išsielektrinimo ir radioaktyvumo reiškinių, o ir pagal elementų atomines mases atrodytų, kad atomo branduolys turėtų būti sudarytas iš protonų ir elektronų. Protonų perteklius branduolyje turėtų sudaryti jo teigiamąjį elektros krūvį ir nulemti paties elemento prigimtį, o elektronų skaičius turėtų apspręsti elemento masę. Antai, helio atomo branduolį – $\alpha$ dalelę – turėtų sudaryti 4 protonai ir 2 elektronai, o ličio – 6 protonai ir 3 elektronai.

Tokią atomo branduolio struktūrą iš dalies lėmė natūralaus radioaktyvumo reiškiniai. Natūraliesiems radioaktyviesiems elementams skylant, jų atomai išspinduliuoja $\alpha$ daleles bei elektronus. Tai lyg įrodymas to, kad atomų branduoliuose turėtų būti elektronų ir kad juose helio branduoliai (4 protonai ir 2 elektronai) sudaro ypatingai stabilią sistemą, nes spinduliuojami ne protonai atskirai, bet $\alpha$ dalelė. Tačiau vėlesni radioaktyvumo reiškinių tyrimai įtikino, kad atomo branduolys negali būti tokios sudėties.

Šiuo metu manoma, kad **atomų branduolius sudaro protònai ir neutrònai, kartu vadinami nukleònais**. Tokios sudėties branduolyje elektronų nėra. Kiekvieną branduolį galima apibūdinti dviem dydžiais: eilės numeriu $Z$, kuris nusako jo elementariųjų krūvių protonų skaičių, ir masės skaičiumi $A$. Pastarasis nurodo bran-

duolį sudarančių dalelių – nukleonų – skaičių branduolyje. Vadinasi, neutronų skaičius $N = A - Z$.

338 paveiksle schemiškai pavaizduota pirmųjų dešimties stabiliųjų ir radioaktyviųjų periodinės elementų sistemos elementų branduolių sudėtis. Abscisių ašyje sužymėtas protonų, o ordinačių ašyje – neutronų skaičius branduoliuose. Skaičiai prie įstrižų tiesių žymi branduolių masės skaičių. Iš paveikslo matyti, kad tą patį protonų skaičių atitinka keletas neutronų skaičių. Tai – to paties elemento *izotòpai*. *Izotopų atomai pasižymi vienodomis cheminėmis ir optinėmis ypatybėmis, bet jų branduolių masės yra skirtingos, todėl savo ypatybėmis skiriasi.* **Branduoliai, turintieji vienodą nukleonų, taigi ir masės, skaičių, vadinami izobãrais.**




338 pav.

Visi žinomi branduoliai užima apysiaurę juostą (338 pav.), kurios vidurinė linija vadinama *stabilùmo lìnija*. Lengvųjų atomų stabilumo linija eina išilgai tiesės $N = Z$, o sunkesniųjų – kyla į viršų. Sunkių branduolių, esančių stabilumo linijoje, neutronų skaičius viršija protonų skaičių iki 1,6 karto, pvz., $^{238}_{92}U$ branduolys turi 92 protonus ir 146 neutronus. Iš gamtoje pasitaikančių atomų jis turi didžiausią protonų ir neutronų skaičių, o iš nestabilių, dirbtinai sukurtų elementų daugiausia protonų turi laurensis $\left(^{257}_{103}Lw\right)$, daugiausia neutronų – net 157 – einšteinis $\left(^{256}_{99}Es\right)$.

Protonus ir neutronus, sudarančius atomų branduolį, patogu vadinti bendriniu nukleonų vardu. Taip abi šias elementariąsias daleles galime laikyti viena ir ta pačia, tik skirtingo būvio dalele – nukleonu. Vienu atveju jis yra elektringoji dalelė – protonas, o kitu atveju – neelektringoji dalelė – neutronas. Jų energija taip pat šiek tiek skiriasi. Nukleonų ypatybės išryškėja, jiems tarp savęs sąveikaujant.

Nukleonų sąveika yra trejopa: a) du protonai ($p$ ir $p$), b) protonas ir neutronas ($p$ ir $n$) ir c) du neutronai ($n$ ir $n$). Tarp nukleonų veikiančios branduolinės jėgos nėra nei visuotinės traukos, nei Kulono jėgos. Jos yra labai stiprios, gerokai stipresnės už jėgas, veikiančias elektriniuose atomo sluoksniuose. Norint nukleoną išlaisvinti iš branduolio, reikia net keleto milijonų elektronvoltų energijos. Branduolinės jėgos veikia tik labai mažais nuotoliais. Jau $10^{-13}$ cm atstumu jos beveik nustoja veikusios. Nukleonams tolstant vienam nuo kito, branduolinės jėgos staigiai silpnėja.

Nors tarp dviejų nukleonų veikia vienodos branduolinės jėgos, bet sąveika tarp dviejų protonų skiriasi nuo sąveikos tarp protono ir neutrono, nes pirmuoju atveju tarp dalelių veikia ir Kulono jėga.

Dviejų nukleonų sąveika priklauso ne tik nuo jų sukinio momentų lygiagretumo, bet ir nuo to, kaip jų atstojamasis sukinio momentas yra pakrypęs tiesės, jungiančios abu nukleonus, atžvilgiu. Sunkesniuose branduoliuose, kurie sudėti iš daugiau kaip 4 nukleonų, pagal Paulio principą nukleonai turi skirtingai nukreiptus orbitinius momentus. Todėl vienodi (*p* ir *p* arba *n* ir *n*) nukleonai negali susijungti, nes jų sukinio momentai nukreipti priešingomis kryptimis. Todėl nėra junginių iš 2 protonų arba 2 neutronų. Taip pat surasta, kad branduolinės jėgos nepriklauso nuo sąveikaujančių nukleonų elektros krūvio.

Nukleonas (protonas arba neutronas) gali būti dviejų skirtingų būsenų. *Neutronas savaime gali virsti protonu.* Šį reiškinį vadiname *n p virtimu*. Neutrono masė ir jo energija yra didesnė už protono masę bei jo energiją. Todėl laisvas neutronas radioaktyviai skyla į protoną ir elektroną, o išlaisvintosios energijos dalis virsta kinetine elektrono energija. Jo pusėjimo trukmė yra apie 12 min. Be to, pagal teorinius samprotavimus, šiame procese turi susidaryti dar viena elementarioji dalelė – *antineutrēnas* ($\tilde{\nu}$)

Neutrono radioaktyvųjį skilimą galima užrašyti taip: $n \rightarrow p + {}^{0}_{-1}e + \tilde{\nu}$ + 0,78 MeV

Panašiai užrašomas protono virtimo neutronu procesas: $n \rightarrow p + {}^{0}_{+1}e + \tilde{\nu}$ – –1,80 MeV

Matome, kad protonas negali savaime virsti neutronu, nes tokiam procesui sunaudojama 1,8 MeV energijos. Sudėtinguose atomų branduoliuose energija gali padidėti bei sumažėti, taigi gali vykti abu procesai, pvz., nestabiliuosiuose branduoliuose neutronas virsta protonu, kai neutronų skaičius juose didesnis už protonų skaičių, o protonas virsta neutronu, kai protonų skaičius juose yra didesnis už neutronų skaičių. Šiuose procesuose atsiradę elektronai $\left({}^{0}_{-1}e\right)$ sudaro radioaktyviųjų medžiagų $\beta^-$ spinduliuotę, o pozitronai $\left({}^{0}_{+1}e\right) - \beta^+$ spinduliuotę.

Branduolinių jėgų pobūdis rodo, kad atomo branduolys vargu ar gali būti kietos arba dujinės agregatinės būsenos. Pirmuoju atveju nukleonai tegalėtų labai nežymiai judėti. Išmatuotos nukleonų orbitinių mechaninių momentų reikšmės rodo, kad jie juda smarkiai. Jei branduolys būtų dujinis, nuotoliai tarp nukleonų būtų dideli ir branduolinės jėgos – gerokai silpnesnės. Netinka branduoliui ir atomo planetinis modelis, nes jis sudarytas iš skirtingų dalelių. Belieka manyti, kad branduolys savo ypatybėmis yra panašus į skysčio lašą.

Molekulinių, kaip ir branduolinių, jėgų veikimo sfera yra ribota; skysčio tankis, kai temperatūra ir slėgis nekinta, yra pastovus ir nepriklauso nuo skysčio molekulių skaičiaus. Nukleonai, kaip ir molekulės, yra pakankamai judrūs. Energija, suteikta branduoliui, jį sužadinant, pagal Maksvelo dėsnį statistiškai pasiskirsto tarp visų branduolio nukleonų, kaip pasiskirsto tarp molekulių suteikta skysčiui perteklinė energija. Tokia prasme branduolio nukleonams galime priskirti tam tikrą temperatūrą, atitinkančią jų vidutinę kinetinę energiją.

Skysčio lašo branduolio modelį pasiūlė Frenkelis, o toliau plėtojo Boras. Pagal šį modelį paaiškinama daug branduolio ypatybių. Lašo modelis nusako branduolio masės kitimą, kintant nukleonų skaičiui, apytiksliai išreiškia branduolio ryšio energiją, apibūdina branduolių $\alpha$ ir $\beta$ skilimų bei dalijimosi energines sąlygas, kokybiškai aprašo bendrą branduolių energijos lygių pasiskirstymo struktūrą ir kt. Tačiau tas modelis negali paaiškinti daug kitų branduolių ypatybių kitimo dėsningumų.

Smulkiau ištyrus branduolių ryšio energiją, jų sukinio magnetinį bei elektrinį momentą, izotopų gausą gamtoje, pasirodė, kad iš visų branduolių reikia išskirti tuos branduolius, kurie turi magiškus skaičius (2, 8, 20, 50, 82 ir 126) neutronų arba protonų. Tokie branduoliai yra itin stabilūs. Atomų branduolių ypatybių (stabilumo, magnetinio bei elektrinio momento ir kt.) periodinis kitimas iškėlė mintį, kad branduoliai, kaip ir atomai, gali turėti sluoksninę struktūrą. Toks atomų branduolio modelis vadinamas *sluoksniniu*.

Pagal kvantinę mechaniką branduoliai gali būti įvairių energinių būsenų. Pagrindinės branduolio būsenos nukleonai užpildo mažesnės energijos lygius. Susiduriant turėtų kisti jų energija; vienas iš jų turėtų netekti jos ir pereiti į mažesnės energijos lygį, tuomet kito energija padidėtų. Tačiau mažesnės energijos lygiai yra užpildyti ir pagal Paulio draudimo principą daugiau nukleonų juose tilpti negali. Todėl praktiškai **branduolyje nukleonai juda, nesąveikaudami tarpusavyje.**

Nukleono būsena branduolyje apibūdinama tam tikrais kvantiniais skaičiais (panašiai kaip elektrono būsena atome).

Sluoksninis branduolio modelis nuodugniau išaiškina kai kuriuos (pvz., $\alpha$ dalelių susidarymo branduolyje bei $\alpha$ skilimo ir kt.) reiškinius. Tačiau ir šis modelis ne visur gerai tinka. Tikslesniu laikomas *apibendrintasis branduolio modelis*. Jį sudarant, atsižvelgiama į nukleonų judėjimo įtaką vidutinio lauko parametrams. Įsivaizduojama, jog branduolys yra deformuojamas ir iš rutulio pavirsta besisukančiu elipsoidu.

## 148. Branduolio ryšio energija

Cheminių elementų izotopų masė išreiškiama tokiais skaičiais, kurie šiek tiek skiriasi nuo sveikųjų. Taip yra todėl, kad nukleonų masės nėra lygios vienetui. Be to, žinoma, **kad branduolių masė yra kiek mažesnė už juos sudarančių nukleonų (protonų ir neutronų) bendrąją masę ir beveik visada mažesnė už branduolių masės skaičių, kuris nusako nukleonų skaičių branduolyje**. Branduolio nukleonų masė sumažėja todėl, kad jam susidarant, išsiskiria energija, nusakanti nukleonų ryšio branduolyje tvirtumą. **Energija, kuri reikalinga atomo branduoliui suskaldyti į atskirus nukleonus, vadinama bránduolio rỹšio ener̃gija.**

Branduolinėje fizikoje energija reiškiama atominiais energijos vienetais. Bet kurios sistemos energijos, išreikštos atominiais energijos vienetais, skaitinė vertė yra lygi tos sistemos masės skaitinei vertei. Atominį energijos vienetą galime surasti, pasinaudodami energijos ir masės sąryšiu ($E = mc^2$). Jis yra lygus $[E/m] = 931{,}5$ MeV/u. Įvedus tokį energijos vienetą, bet kurio branduolio masė ir energija nusakoma tuo pačiu skaičiumi.

Tegu branduolyje yra $Z$ protonų ir $N$ neutronų. Pažymėkime protono masę $m_p$, neutrono masę – $m_n$, o visą branduolio masę $M_b$. Tokio branduolio ryšio energija:

$$\Delta E = (Zm_p + Nm_n - M_b)\,c^2. \qquad (314)$$

Apskritai, branduolio nukleonų ryšio energija, palyginus su elektrono ir branduolio ryšio energija, yra labai didelė, pvz., deguonies branduolio $^{16}_{8}O$ ryšio energija $\Delta E\,(^{16}_{8}O) = [(8 \cdot 1{,}008245) + + (8 \cdot 1{,}008986) - 16]$ a.v. $= 0{,}137048$ a.v. $= 128$ MeV, o vandenilio ir branduolio $^{1}_{1}H$ ji lygi tik 13,5 eV.

Branduolio ryšio energiją apibūdina ir **bránduolio mãsės defèktas – skirtumas tarp branduolio masės $M_b$ ir jo masės skaičiaus A:**

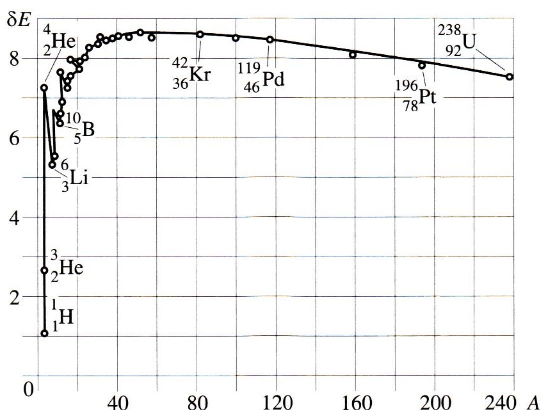
$$\Delta M = M_b - A. \quad (315)$$

Branduolio ryšio energija daugiausia priklauso nuo nukleonų skaičiaus $A$ branduolyje ir tik nežymiai priklauso nuo nukleonų rūšies (protonų arba neutronų). *Ryšio energija yra reikšmingiausias branduolį charakterizuojantis dydis.* Ją galima surasti išmatavus branduolio ir jį sudarančių nukleonų mases.

Branduolių *savitóji rỹšio enẽrgija* $\delta E = \frac{\Delta E}{A}$ (vidutinė energija $\Delta E$, apskaičiuota vienam branduolio nukleonui) rodo, kad grafikas, vaizduojantis $\Delta E$ priklausomybę nuo $A$, nėra tiesė.

339 paveiksle parodyta $\delta E$ priklausomybės nuo $A$ kreivė. Pagal jos formą matyti, kad skirtinguose branduoliuose nukleonai susiję nevienodai stipriai. Stipriausias ryšys ($\delta E$ didžiausias) yra tų branduolių, kurių masės skaičius svyruoja nuo 40 iki 100. Šių branduolių $\delta E$ beveik nekinta ir yra lygi 8,7 MeV. Didėjant nukleonų skaičiui branduoliuose, kurių $A > 100$, $\delta E$ mažėja, pvz., urano $^{238}_{92}U$ $\delta E$ = 7,5 MeV.

Lengvųjų branduolių ($A < 40$) $\delta E$, mažėjant nukleonų skaičiui, mažėja. Šioje kreivės dalyje matome smailias iškylas ir įdubas.




339 pav.

**Didžiausia savitoji ryšio energija būdinga tiems branduoliams, kurių protonų bei neutronų skaičius yra lyginis**, pvz., $^{4}_{2}He$, $^{12}_{6}C$ ir kt., **mažiausia savitoji ryšio energija – tiems branduoliams, kurių protonų ir neutronų skaičius yra nelyginis**, pvz., $^{6}_{3}Li$, $^{10}_{5}B$ ir kt. Branduolių, sudarytų iš lyginio protonų (arba neutronų) ir nelyginio neutronų (arba protonų) skaičiaus, savitosios ryšio energijos $\delta E$ reikšmė yra tarp $\delta E_{max}$ ir $\delta E_{min}$. **Vadinasi, branduolių ryšio energija priklauso ne tik nuo visų nukleonų skaičiaus, bet ir nuo to, lyginis ar nelyginis yra protonų bei neutronų skaičius branduolyje.**

Taigi **ryšio energija – tai energija, kurią reikėtų išeikvoti norint branduolį suskaldyti į atskirus nukleonus**.

Atominėje fizikoje energija dažnai matuojama elektronvoltais (eV), o masė – atominiais masės vienetais (a.m.v. arba u): 1 eV = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J; 1 u = $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ kg.

Kad geriau suprastume masės defekto ir ryšio energijos sąvokas, išspręskime keletą paprasčiausių uždavinių.

1. Nustatykime boro $^{11}_{5}B$ branduolio masės defektą ir ryšio energiją.

$^{11}_{5}B$ | $M_{^{11}_{5}B} = 11{,}00930$

$\Delta M$ – ?; $\Delta E_r$ – ?

Sprendimas

Užrašome masės defekto ir ryšio energijos apskaičiavimo formules:

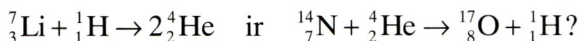
$\Delta M = (Zm_p + Nm_n - M_b)$; $\Delta E_r = (Zm_p + Nm_n - M_b)c^2$.

Duotame boro branduolyje yra 5 protonai ir 6 neutronai. „Priedų" lentelėje „Pagrindinės konstantos" randame, kad $m_p = 1{,}00728$ u, o $m_n = 1{,}00866$ u. Kadangi boro atome yra 5 elektronai, tai bendra jų masė $m_e = 5 \cdot 0{,}000548$ u $= 0{,}00274$ u. Boro atomo branduolio masę randame taip: $M_{b\,{}^{11}_{5}\mathrm{B}} = \mathrm{M}_{{}^{11}_{5}\mathrm{B}} - m_e$. Įrašę skaitines reikšmes gauname, kad $M_{b\,{}^{11}_{5}\mathrm{B}} = 11{,}00930\ \mathrm{u} - 0{,}00274\ \mathrm{u} = 11{,}00656\ \mathrm{u}$. Į masės defekto formulę įrašome jau žinomus duomenis ir apskaičiuojame: $\Delta M = (5 \cdot 1{,}00728\ \mathrm{u} + 6 \cdot 1{,}00866\ \mathrm{u} - 11{,}00656\ \mathrm{u}) = 0{,}0818\ \mathrm{u}$. Gautą masės defekto vertę padauginame iš masės ir energijos sąryšio koeficiento (žr. lentelę „Pagrindinių konstantų išvestiniai dydžiai") ir apskaičiuojame ryšio energijos vertę:

$$\Delta E_r = 0{,}0818\ \mathrm{u} \cdot 931{,}5\ \mathrm{MeV/u} = 76{,}1967\ \mathrm{MeV} \approx 76{,}2\ \mathrm{MeV}.$$

Atsakymas. ${}^{11}_{5}\mathrm{B}$ branduolio masės defektas lygus 0,0818 u, o ryšio energija – ≈ 76,2 MeV.

2. Kurioje branduolinėje reakcijoje energija išsiskiria ir kurioje sugeriama, kai



${}^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow 2\,{}^{4}_{2}\mathrm{He}$ ir ${}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$?

Sprendimas

Branduolinio virsmo metu dalis branduolio vidinės energijos (ryšio energijos) gali virsti kitų rūšių energija, pavyzdžiui, naujųjų dalelių kinetine energija. Pagal energijos tvermės dėsnį vidinės energijos pokytis lygus dalelių kinetinės energijos pokyčiui.

Pirmoji reakcija:

$\Delta E_{r1} = \Delta M_1\, c^2$;

$$\Delta M_1 = \left(M_{{}^{7}_{3}\mathrm{Li}} + M_{{}^{1}_{1}\mathrm{H}}\right) - 2M_{{}^{4}_{2}\mathrm{He}}.$$

Antroji reakcija:

$\Delta E_{r2} = \Delta M_2\, c^2$;

$$\Delta M_2 = \left(M_{{}^{14}_{7}\mathrm{N}} + M_{{}^{4}_{2}\mathrm{He}}\right) - \left(M_{{}^{17}_{8}\mathrm{O}} + M_{{}^{1}_{1}\mathrm{H}}\right).$$

Lentelėje „Kai kurių elementų izotopų santykinė atominė masė" radę šių izotopų mases, apskaičiuojame masės defektus ir ryšio energijas.

$\Delta M_1 = (7{,}01601\ \mathrm{u} + 1{,}00783\ \mathrm{u}) - 2 \cdot 4{,}00260\ \mathrm{u}$;
$\Delta M_1 = +\,0{,}01864\ \mathrm{u}$.
$\Delta E_{r1} = +\,0{,}01864\ \mathrm{u} \cdot 931{,}5\ \mathrm{MeV/u} \approx +17{,}36\ \mathrm{MeV}$.
$\Delta M_2 = (14{,}00307\ \mathrm{u} + 4{,}00260\ \mathrm{u}) - (16{,}99913\ \mathrm{u} + 1{,}00783\ \mathrm{u})$;
$\Delta M_2 = -\,0{,}00129\ \mathrm{u}$.
$\Delta E_{r2} = -\,0{,}00129\ \mathrm{u} \cdot 931{,}5\ \mathrm{MeV/u} \approx -\,1{,}2\ \mathrm{MeV}$.

Atsakymas. Vykstant pirmajai reakcijai, energija išsiskiria, nes masės defektas teigiamas ($\Delta M_1 > 0$); antrosios reakcijos metu energija absorbuojama, nes masės defektas neigiamas ($\Delta M_2 < 0$).

## Klausimai ir užduotys

**1. Apskaičiuokite deguonies branduolio $^{16}_{8}O$ masės defektą ir ryšio energiją.**

**2. Kurioje branduolinėje reakcijoje energija išsiskiria ir kurioje sugeriama: $^{7}_{3}Li + ^{1}_{1}H \rightarrow 2^{4}_{2}He$; $^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$? Kokia kiekvienos reakcijos ryšio energija?**

**3. Vienam urano $^{235}_{92}U$ branduoliui dalijantis į dvi skeveldras, išsiskiria 200 MeV energijos. Kiek energijos išsiskiria sudegus branduoliniame reaktoriuje 1g šio urano izotopo? Kiek reikia akmens anglies tokiam pat energijos kiekiui gauti?**

## 149. Branduolinės reakcijos. Radioaktyviųjų virsmų poslinkio taisyklė

**Atomų branduolių kitimas, jiems natūraliai arba dėl sąveikos su kitais branduoliais bei elementariosiomis dalelėmis suyrant, vadinamas branduolinė reákcija.** Paprastai tai atsitinka sunkiuosius branduolius apšaudant elementariosiomis dalelėmis arba lengvųjų atomų branduoliais.

Simbolinė branduolinės reakcijos schema yra tokia:



$$X + a \rightarrow Y + b; \quad (316)$$

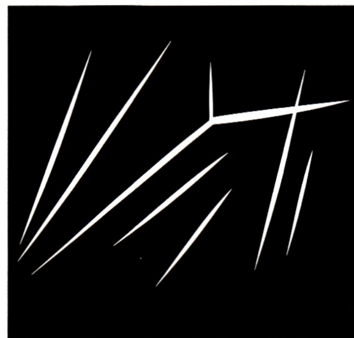
čia $X$ – pirminis atomo branduolys, $Y$ – antrinis atomo branduolys; $a$ – veiklioji dalelė, $b$ – antrinė dalelė.

Istoriniu požiūriu pirmoji branduolinė reakcija – tai azoto virsmo deguonies izotopu reakcija: $^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$.

Šią reakciją patvirtina alfa dalelės pėdsakas Vilsono kameroje. Fotografijoje matomas išsišakojęs pėdsako galas (340 pav.), kuriame storoji atšaka yra deguonies branduolio, plonoji – protono.

Apšaudant alfa dalelėmis berilį, buvo atrastos naujos elementariosios dalelės – neutronai: $^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n$.

Neutronas yra labai skvarbus, nes jis neturi elektros krūvio. Susidūręs su sunkesniu branduoliu, neutronas atšoka, beveik nepraradęs energijos. Susidūręs su lengvuoju branduoliu, jam perduoda dalį savo energijos ir sulėtėja. Lėtieji neutronai dažniau sukelia branduolines reakcijas. Efektyviausi neutronų lėtikliai yra daug vandenilio turinčios medžiagos – sunkusis vanduo ($D_2O$), parafinas ($C_{22}H_{46}$), grafitas, berilio junginiai ir kt.



340 pav.

Branduolinėms reakcijoms galioja krūvio ir masės skaičiaus, judesio kiekio, energijos ir kiti tvermės dėsniai. Be to, jas apibūdina reakcijos energija $Q$, kuri lygi pirminių ir antrinių branduolinės reakcijos porų kinetinių energijų skirtumui arba proporcinga jų masių skirtumui. **Kai $Q < 0$, antrinės poros masė didesnė už pirminės poros masę ir tokia reakcija vadinama endotèrmine.** Ji gali vykti tik tada, kai pir-

minė pora sugeria energiją. Praktikoje svarbesnės yra **egzoterminės reakcijos, išskiriančios energiją ($Q > 0$).**

**Valdant veikliosios dalelės kinetinę energiją, galima valdyti pačią branduolinę reakciją.**

Kaip jau minėta, β spinduliai silpniau jonizuoja dujas (50 jonų porų 1 cm oro kelyje), tačiau yra skvarbesni už α daleles (kelių milimetrų storio metalo sluoksnis β spindulius visiškai sulaiko). Skvarbiausi yra γ spinduliai – trumpos elektromagnetinės bangos. Juos sulaiko storesnis negu 20 cm švino sluoksnis. γ spinduliai dažniausiai skleidžiami po α ir β spindulių. Mat išspinduliavęs α ir β dalelę, branduolys dažnai būna sužadintas. Grįždamas į normaliąją būseną, jis ir išspinduliuoja γ kvantus.

Remiantis eksperimentiniais radioaktyvaus spinduliavimo dėsningumais, formuluojama radioaktyviųjų virsmų poslinkio taisyklė: **išspinduliavęs α dalelę, cheminis elementas virsta nauju elementu, kuris pasislenka per dvi vietas į periodinės elementų sistemos pradžią, o išspinduliavęs β dalelę – per vieną vietą į periodinės elementų sistemos pabaigą.** Simboliškai šie poslinkiai užrašomi taip:



$$ {}_Z^AX + {}_2^4\mathrm{He} \to {}_{Z-2}^{A-4}Y \quad \text{ir} \quad {}_Z^AX \to {}_{-1}^{0}e + {}_{Z+1}^{A}Y. \qquad (317)$$

Antriniai branduoliai dažnai būna radioaktyvūs, jie virsta kitais branduoliais, kol susidaro stabilus izotopas. Galutinis radioaktyviųjų urano virsmų rezultatas – stabilus švino izotopas ${}_{82}^{206}\mathrm{Pb}$, torio – ${}_{82}^{208}\mathrm{Pb}$, aktinio – ${}_{82}^{207}\mathrm{Pb}$.

Kadangi radioaktyvumas nepriklauso nuo išorinių sąlygų, tai iš švino kiekio Žemės plutoje galima spręsti apie jos amžių (maždaug 4 mlrd. metų).

## Klausimai ir užduotys

**1. Kokių elementų atomų branduoliuose yra 3 protonai ir 4 neutronai; 5 protonai ir 6 neutronai?**

**2. Iš ko sudaryti nikelio ${}_{28}^{60}\mathrm{Ni}$ ir berilio ${}_{4}^{9}\mathrm{Be}$ branduoliai?**

**3. Koks elementas susidaro iš ${}_{92}^{238}\mathrm{U}$, įvykus α skilimui ir dviem β skilimams?**

**4. Įrašykite nežinomus branduolinių reakcijų lygčių narius: ${}_2^4\mathrm{He} + {}_4^9\mathrm{Be} \to {}_6^{12}\mathrm{C} + ?$ ir ${}_{13}^{27}\mathrm{Al} + ? \to {}_{15}^{30}? + {}_0^1n$.**

# 150. Izotopai. Radioaktyviųjų izotopų naudojimas praktikoje

Tyrinėdami radioaktyvumo reiškinį ir stebėdami milžinišką skaičių radioaktyviųjų virsmų, mokslininkai atrado, kad kai kurių medžiagų radioaktyviosios savybės yra skirtingos (t. y. tos medžiagos skyla skirtingai), nors jų cheminės savybės visiškai vienodos. Šių medžiagų niekaip nebuvo galima išskirti žinomais cheminiais būdais. Tuo remdamasis, 1911 m. Sodis paskelbė hipotezę, kad egzistuoja elementai, pasižymintys vienodomis cheminėmis savybėmis, bet besiskiriantys kitais atžvilgiais (tarp jų ir radioaktyvumu). Šiuos elementus jis pasiūlė įrašyti į tą patį periodinės elementų sistemos langelį ir pavadino *izotòpais* (t. y. užimančiais tą pačią vietą).

Tomsonas, tirdamas, kaip elektringosios dalelės nukrypsta elektriniuose ir magnetiniuose laukuose, tiksliai išmatavo neono jonų masę. Jis nustatė, kad neoną sudaro dviejų rūšių atomai. Didesnės jų dalies atominė masė lygi 20, o nedaugelio atomų masė lygi 22. Todėl mišinio atominė masė lygi 20,2. Atomų, pasižyminčių tomis pačiomis cheminėmis savybėmis, masės skaičius skyrėsi. Abiejų rūšių neono atomai užima tą pačią vietą periodinėje elementų lentelėje ir yra izotopai. *Taigi gali skirtis ne tik radioaktyviosios izotopų savybės, bet ir jų skaičius.* Izotopų branduolių krūviai yra lygūs, todėl elektronų skaičius atomų apvalkaluose, o kartu ir izotopų cheminės savybės yra vienodos. Bet izotopų branduolių masės skaičius skirtingas. Be to, branduoliai gali būti ir radioaktyvūs, ir stabilūs. Taigi radioaktyviųjų izotopų savybės skiriasi dėl to, kad jų branduolių masės skaičius yra nevienodas.

Šiuo metu nustatyta, kad izotopus turi visi cheminiai elementai, o kai kurie jų – tik nestabilius (t. y. radioaktyvius). Izotopų turi ir pats sunkiausias gamtoje elementas – uranas (jo izotopų atominė masė 238, 235 ir kt.), ir pats lengviausias – vandenilis (jo izotopų atominė masės 1, 2, 3).

Ypač įdomūs vandenilio izotopai, nes jų masės skaičius tarpusavyje skiriasi du ar tris kartus. Izotopas, kurio atominė masė lygi 2, vadinamas *dèuteriu*. Jis stabilus (t. y. neradioaktyvus) ir aptinkamas kartu su lengviausiu vandeniliu (santykiu 1 : 4500). Jungiantis deuteriui su deguonimi, susidaro vadinamasis *sunkùsis vanduõ*. Jo fizinės savybės skiriasi nuo paprastojo vandens savybių. Esant normaliam atmosferos slėgiui, sunkusis vanduo užverda 101,2 °C temperatūroje, o užšąla 3,8 °C temperatūroje.

Vandenilio izotopas, kurio atominė masė lygi 3, vadinamas *tričiù*. Jis yra β radioaktyvus. Tričio pusėjimo trukmė – apie 12 metų.

Izotopai įrodo, kad nuo atomo branduolio krūvio, vadinasi, ir nuo elektronų apvalkalo sandaros priklauso ne visos atomo savybės, o tik cheminės ir tos fizinės savybės, kurios priklauso nuo elektronų apvalkalo išorinės dalies, pavyzdžiui, matmenys.

Tiksliai nustačius izotopų atominių masių vertes, pasirodė, jog jos labai artimos sveikiesiems skaičiams. Kai kurių cheminių elementų atominių masių vertės nėra sveikieji skaičiai. Pavyzdžiui, chloro atominė masė lygi 35,5. Vadinasi, natūrali chemiškai gryna medžiaga yra įvairių jos izotopų mišinys, o tai, kad izotopų atominės masės artimos sveikiesiems skaičiams, labai svarbu tiriant atomo branduolio sandarą.

Pramoniniu būdu radioaktyvieji izotopai gaunami atominiuose reaktoriuose, veikiant neradioaktyvius elementus stipriu neutronų srautu. Šiuo metu gauta net po keletą kiekvieno elemento radioaktyviųjų izotopų, ir jų skaičius jau viršija 800. Daugelis jų plačiai taikomi įvairiose mokslo ir technikos srityse: biologijoje, žemės ūkyje, medicinoje ir kt. Radioaktyvieji izotopai naudojami kaip *žymétieji atomai ir kaip spinduliãvimo šaltìniai*.

**Žymėtieji atomai – tai kurio nors elemento radioaktyviojo izotopo atomai.** Kadangi izotopų (radioaktyviųjų ir neradioaktyviųjų) cheminės savybės yra tapatingos, tai, į neradioaktyvųjį elementą įmaišius nedidelį kiekį to paties elemento

radioaktyviojo izotopo, visuose procesuose (cheminiuose, fiziniuose, biologiniuose) vienodai dalyvaus ir neradioaktyvusis, ir radioaktyvusis izotopas. Tačiau radioaktyvųjį izotopą galima susekti iš spinduliavimo – jis tarsi „pažymi“ savo buvimo vietą. Taikant žymėtųjų atomų metodą, skaitikliais galima užregistruoti tik labai mažas šių atomų koncentracijas.

Išnagrinėkime, kaip žymėtųjų atomų metodu tiriamas žemės ūkio augalų mitybos procesas, pavyzdžiui, fosforo įsisavinimas. Šiuo tikslu į superfosfatą įmaišomas nedidelis kiekis radioaktyviojo fosforo $^{32}_{15}P$ ir trąšos įterpiamos į dirvą aplink augalą. Vėliau skaitikliais tiriama įvairių augalo dalių radioaktyvioji spinduliuotė. Taip galima nustatyti, kada fosforas patenka į augalo šaknų sistemą, kokiu greičiu jis juda augalu, kuriose dalyse susikaupia ir pan. Norint sužinoti, kaip kuris nors elementas pasiskirsto atskirose augalo dalyse, pavyzdžiui, lape, vaisiuje, sėkloje ar net ląstelėje, naudojamas fotoplokštelių metodas. Augalas patręšiamas tiriamo elemento radioaktyviuoju izotopu, o po tam tikro laiko tiriamoji augalo dalis supjaustoma plonais sluoksneliais, kurie prispaudžiami prie fotoplokštelės. Šių sluoksnelių radioautografai ir parodo radioaktyviojo izotopo susikaupimo vietas. Pavyzdžiui, įterpus į dirvą, kurioje auga pomidorai, radioaktyvųjį cinką ($ZnCl_2$), nustatyta, kad jis koncentruojasi pomidoro vaisiaus požievio sluoksnyje ir sėklose. Iš tokių tyrimų galima spręsti, kurias mineralines medžiagas augalas geriausiai įsisavina, kuriuo vegetacijos periodu šių medžiagų jam reikia daugiausia ir pan.

Žymėtieji atomai pakeitė kai kurias nusistovėjusias pažiūras į gamtos procesus. Pavyzdžiui, iki pastarojo laiko buvo manoma, kad mineralinės medžiagos patenka į augalą tik pro šaknis. Panaudojus radioaktyvųjį fosforą, buvo įrodyta, kad augalas jį įsisavina ir pro lapus. Ilgą laiką buvo manoma, kad augalai tik šviesoje iš oro įsisavina $CO_2$ ir išskiria $O_2$. Panaudojus radioaktyviąją anglį $^{14}C$, buvo nustatyta, kad augalai ir tamsoje įsisavina iš oro $CO_2$, tik be šviesos „neiškvepia“ deguonies.

Žymėtieji atomai padeda ir bitininkams. Jais nustatoma, kaip toli nuo avilio skrenda bitės, kokius augalus jos lanko. Bitės avilyje pamaitinamos radioaktyviu sirupu ir sekamos įvairiais nuotoliais nuo avilio. Skaitikliai padeda atpažinti „savąsias“ bites, nes jos yra radioaktyvios. Panašiu principu tiriama ir žemės ūkio kenkėjų migracija.

Medicinoje žymėtieji atomai naudojami tiriant medžiagų apykaitos greitį, jų pasiskirstymą žmogaus organizme, taip pat diagnozuojant kai kuriuos susirgimus. Pavyzdžiui, tyrimais su radioaktyviuoju fosforu nustatyta, kad, įvedus į organizmą fosforo, daugiausia jo susikaupia kauluose, bet, laikui bėgant, fosforo koncentracija mažėja. Taip įrodyta, kad kaulų medžiaga nepaliaujamai atsinaujina. Radioaktyvusis fosforas taip pat naudojamas augliams galvos smegenyse aptikti. Smegenų audiniuose medžiagų apykaita vyksta lėtai, todėl į organizmą įvesto fosforo koncentracija čia yra maža. Tačiau jei smegenyse yra auglys, jo audiniai per tą patį laiką sugeria 10–100 kartų daugiau fosforo. Taigi pagal spinduliuotės intensyvumą galima nustatyti auglio vietą ir dydį.

Panašiu būdu žymėtaisiais atomais tiriama ir galvijų bei paukščių organizmų medžiagų apykaita. Taip sužinoma, kurios medžiagos tam tikru vegetacijos periodu

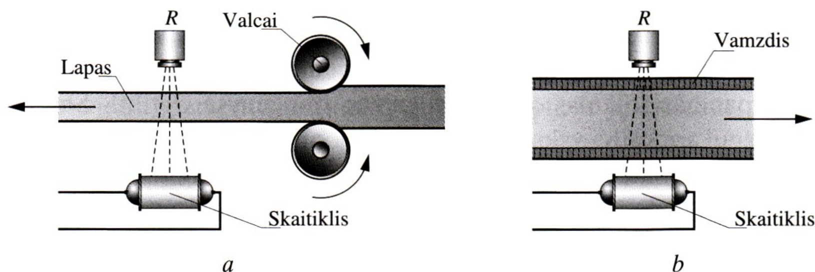
labiausiai reikalingos organizmui. Pagal tai sudarius atitinkamus pašarų racionus, per trumpiausią laiką gaunamas didžiausias prieaugis.

Technikoje žymėtaisiais atomais galima sekti, pavyzdžiui, detalių (stūmoklių ir jų žiedų, guolių ir pan.) susidėvėjimo greitį. Tam detalės švitinamos neutronais (atominiame reaktoriuje), ir dalis jų atomų virsta radioaktyviaisiais. Varikliui dirbant, besitrinančių dalių radioaktyvumas mažėja, nes dalis atomų pereina į tepalą. Matuojant tepalo radioaktyvumą, galima spręsti apie detalių dėvėjimąsi, neišardžius mašinos, tiesiog darbo metu.

Radioaktyvieji izotopai plačiai naudojami ir kaip spindulių šaltiniai. Stiprus $\gamma$ spindulių šaltinis yra metalinė ampulė, užpildyta radžiu. Radis spinduliuoja $\alpha$ daleles, o jo produktai – $\alpha$ ir $\beta$ daleles, ir šiuos skilimus dažniausiai lydi $\gamma$ spinduliuotė. Ampulės sienelės $\alpha$ ir $\beta$ spindulius absorbuoja, o $\gamma$ spinduliai pro jas praeina. Tačiau radis yra retas ir brangus elementas, todėl, atradus dirbtinį radioaktyvumą, jį pakeitė gerokai paprasčiau gaunami radioaktyvieji kobalto $^{60}_{27}Co$ ir cezio $^{137}_{55}Cs$ izotopai, kurie, kaip ir radis, yra didelio intensyvumo $\gamma$ spindulių šaltiniai.

Didelis $\gamma$ spindulių skvarbumas ir jų biologinis veikimas taikomas įvairiose gyvenimo srityse, pavyzdžiui, $\gamma$ spinduliais sterilizuojami maisto produktai (konservų gamyboje), vaistai (farmacijos pramonėje), medicinos prietaisai ir pan. Sterilizuojant $\gamma$ spinduliais, nereikia preparatų kaitinti ir, be to, jie švitinami jau įpakuoti. Mokslinio tyrimo centruose žemės ūkio augalų sėklos ir patys augalai švitinami radioaktyviųjų izotopų spinduliais siekiant sukelti juose morfologinius pakitimus ir išvesti, naujas derlingesnių, greičiau bręstančių, atsparių šalčiui bei ligoms augalų rūšis. Perspektyvus yra sandėliuojamų bulvių švitinimas $\gamma$ spinduliais: tam tikra doze apšvitintos bulvės pavasarį neišleidžia daigų, taigi prailginamas sandėliavimo laikas ir sumažinami bulvių nuostoliai. Medicinoje intensyviais $\gamma$ spinduliais (kobalto patrankomis) gydomi piktybiniai augliai (auglio ląstelės yra gerokai jautresnės $\gamma$ spinduliams negu sveiko audinio ląstelės).

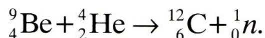
Technikoje $\gamma$ spinduliais nustatomi įvairūs metalo liejinių defektai, tikrinama suvirinimo siūlių kokybė. $\gamma$ spindulių defektoskopija yra patogesnė už rentgeno spindulių defektoskopiją, nes pastarajai reikalinga gana sudėtinga elektrinė aparatūra. 341 paveiksle pavaizduotos automatinės technologinio proceso kontrolės schemos, kuriose pritaikyta radioaktyviojo spinduliavimo absorbcija: a) valcuojamo metalo (plastmasės, gumos) lapo storio tikrinimas; b) vamzdžiu tekančio skysčio tankio matavimas.




341 pav.

# 151. Neutrono atradimas

1932 m. D. Čedvikas (*Chedvick*), švitindamas berilio plokštelę α dalelėmis, pastebėjo neutroną. Reakcijos metu berilio atomo branduolys $^{9}_{4}Be$ absorbuoja dalelę ir išspinduliuoja neutroną $^{1}_{0}n$, virsdamas anglies atomo branduoliu $^{12}_{6}C$:



$$^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n.$$

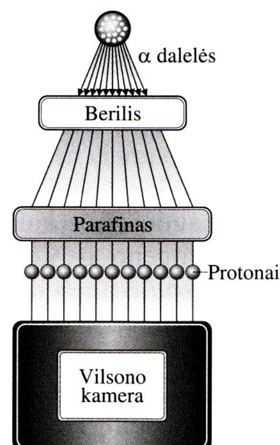
Tokia reakcija vyksta radžio druskos (α dalelių šaltinis) ir berilio miltelių mišinyje. Ampulė, pripildyta tokio mišinio, yra gana stiprus neutronų šaltinis. Neutronai susikuria taip pat daužant branduolius didelės energijos protonais, γ fotonais ir kt. dalelėmis. Galingas neutronų šaltinis yra atominis reaktorius.

Kadangi neutronai neturi elektros krūvio, tai jie, eidami pro medžiagas, beveik nesąveikauja su atomų bei molekulių elektronais ir nesukelia jonizacijos. Neutronai sąveikauja tik su atomų branduoliais, bet branduolių matmenys labai maži, todėl ir neutronų susidūrimo su jais tikimybė yra maža. Taigi neturonai pasižymi didele skvarba ir lengvai praskrieja gana storus medžiagų sluoksnius. Dėl mažos jonizacijos galios neutronų negalima aptikti įprastiniais metodais, kuriais stebimos jonizaciją sukeliančios dalelės. Neutronai susekami pagal antrinius reiškinius, kuriuos jie sukelia, sąveikaudami su atomų branduoliais. Dažniausiai branduolys absorbuoja neutroną. Toks sužadintas branduolys, pereidamas į normalų būvį, išspinduliuoja γ fotoną ar kitokią elektringąją dalelę, kurią galima užregistruoti anksčiau nagrinėtais prietaisais.

Tačiau kai kuriais atvejais, pavyzdžiui, neutronui susiduriant su vandenilio deuterio, anglies ir kitų elementų atomų branduoliais, įvyksta tamprieji smūgiai, kurių metu neutronai perduoda šiems branduoliams didelę dalį savo kinetinės energijos. Didžiausią greitį neutronai gali suteikti vandenilio branduoliams – protonams. Todėl, stebint neutronus, jų kelyje pastatoma medžiaga, turinti didelį kiekį vandenilio, pavyzdžiui, parafino plokštelė (342 pav.). Neutronai išmuša iš parafino protonus, kuriuos galima registruoti įprastiniais metodais.

Atradus neutronus, dirbtinai sukeliamų branduolinių reakcijų skaičius smarkiai padidėjo. Neutronai, būdami neutralūs, gali lengvai prasiskverbti į atomų branduolius, nes jų neveikia kuloninės stūmos jėgos.

Įdomi yra branduolinė reakcija $^{14}N(n, p)^{14}C$, kuri nepaliaujamai vyksta atmosferoje, veikiant oro azotą kosminių spindulių sukurtais neutronais. Pasigaminęs anglies izotopas $^{14}C$ yra β radioaktyvus, jo pusėjimo trukmė lygi 5700 m. Reikia pabrėžti, kad šios anglies kiekis atmosferoje nesikeičia, nes per laiko vienetą suskilusių atomų skaičius vidutiniškai lygus pasigaminusių atomų skaičiui. Radioaktyviosios anglies izotopą, vykstant fotosintezei, įsisavina augalai, o į gyvuosius organizmus jis patenka iš augalinio maisto. Kol organizmas gyvas, dėl spinduliavimo suskilusios anglies $^{14}C$ kiekį jis pasipildo iš aplinkos. Nustatyta, kad 1 grame anglies, gautos iš gyvos organinės



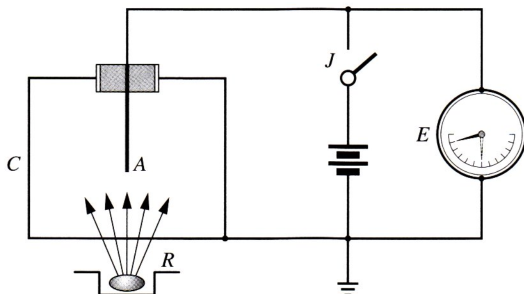

342 pav.

medžiagos, kas minutę įvyksta apie 15 skilimų. Organizmui mirus, anglies dioksidas iš atmosferos neįsisavinamas ir $^{14}C$ koncentracija organizme mažėja pagal radioaktyviojo skilimo dėsnį. Vadinasi, nustačius, kiek β skilimų įvyksta 1 grame anglies, gautos iš mirusio organizmo (medienos, kaulų ir pan.), galima sužinoti jo mirties laiką, t. y. archeologinės iškasenos amžių. Šis *radiokarbonìnis metòdas* plačiai taikomas šiuolaikinėje archeologijoje.

## 152. Branduolinės spinduliuotės registravimo prietaisai

Elementariųjų dalelių savybės ir jų sąveika su atomų branduoliais tiriama prietaisais ar įrenginiais, kurių veikimas dažniausiai yra pagrįstas elektringųjų dalelių gebėjimu jonizuoti arba sužadinti medžiagos atomus. Neutronai ir γ kvantai taip pat stebimi tiriant jonizaciją, sukeltą elektringųjų dalelių, atsirandančių jiems sąveikaujant su atomų branduoliais ir elektronais. Susipažinkime su kai kurių prietaisų veikimo principais.

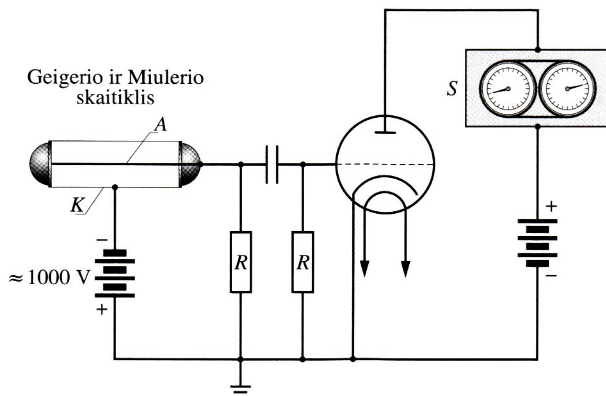
**1. Jonizãvimo kãmera.** Ją sudaro plonasienis metalinis cilindras *C* su izoliatoriuje įtaisytu strypeliu (elektrodu) *A* (343 pav.). Jungikliu *J* prijungus srovės šaltinį, kameros elektrodas įelektrinamas teigiamai, o sienelės – neigiamai. Taip įsielektrina ir lygiagrečiai kamerai prijungtas elektrometras *E*: jo lapelis atsilenkia tam tikru kampu. Dalelės, skriedamos kameroje, jonizuoja oro molekules. Susidarę neigiamieji jonai mažina kameros elektrodo potencialą (srovės šaltinis jau atjungtas), ir elektrometro lapelis pamažu grįžta į pradinę padėtį. Lapelio judėjimo greitis priklauso nuo spindulių jonizacijos gebos ir potencialų skirtumo tarp sienelių ir elektrodo. Šis greitis tik tada apibūdina tikrąjį kameroje sukurtų jonų kiekį, kai kameros įelektrinimo potencialų skirtumas atitinka jos prisotinimo režimą.



343 pav.

Dabartiniu metu mažos (nykštukinės) jonizavimo kameros plačiai naudojamos kaip individualūs rentgeno ir γ spinduliuotės *dozimètrai*.

**2. Geĩgerio ir Miùlerio skaitìklis.** Jonizavimo kamera matuojama jonizacija, kurią sukelia didelis dalelių kiekis. Labai silpna vienos dalelės sukelta jonizacija matuojama Geigerio ir Miu-



344 pav.

lerio skaitikliu. Jį sudaro katodas *K*, plonasienis metalinis vamzdelis, kurio ašies kryptimi tarp izoliacinių kamščių ištempta plona metalinė vielutė – anodas *A* (344 pav.). Vamzdelio viduje yra apie 90% idealiųjų dujų ir apie 10% daugiaatomių dujų, pavyzdžiui, argono ir spirito garų. Mišinio slėgis siekia 100–150 mmHg. Kad skaitiklis būtų patvaresnis, jis dažnai įstatomas į stiklinį vamzdelį, pro kurį nuo katodo ir anodo išvedami kontaktai. Šiuo atveju katodą sudaro plonas vario ar grafito sluoksnelis, apgaubiantis anodo siūlelį vamzdelio viduje. Mažą energiją turinčioms α ir β dalelėms registruoti plačiai naudojami vadinamieji *galùlangiai skaitìkliai*. Jie panašūs į metalinį varpelį, kurio pagrindą dengia plona žėručio folija. Anodas čia yra standžiai įtvirtintas metalinis smaigas.

Tarp skaitiklio anodo ir katodo prijungiamas nuolatinės srovės šaltinis, kurio įtampa šiek tiek mažesnė už savaiminės iškrovos įtampą (apie 1000 V). Įlėkusi į vamzdelį, dalelė jonizuoja dujų atomus, t. y. sukuria savo kelyje teigiamuosius jonus ir elektronus. Pastarieji elektriniame lauke įgyja tokį greitį, kad pajėgia ne tik sužadinti, bet ir jonizuoti dujų atomus. Taigi vyksta smūginė jonizacija, ir prie skaitiklio vielutės susidaro elektronų griūtis. Be to, sužadinti argono atomai spinduliuoja ultravioletinius spindulius, kuriuos aktyviai absorbuoja skaitiklyje esantys spirito garai. Ultravioletinių spindulių fotonų energija yra šiek tiek didesnė už spirito molekulių jonizacijos energiją, todėl pastarosios virsta teigiamaisiais jonais. Išlaisvinti elektronai sukelia antrinę smūginę jonizaciją, ties skaitiklio vielute susidaro naujos elektronų griūtys ir t. t. Elektronai, pasiekę vielutę, sumažina jos teigiamą potencialą, o kartu ir prie jos prijungto elektroninės lempos tinklelio potencialą. Vadinasi, atsiranda trumpalaikis triodo anodo srovės pokytis, dėl kurio elektromagnetinio impulsų skaitiklio *S* rodyklė pašoka per vieną padalą. Būtina pabrėžti, kad ultravioletinių spindulių fotonai skaitiklio katodo (sienelių) nepasiekia. Jie sukelia spirito garų jonizaciją tik nedidelio skersmens cilindrinėje dalyje apie vielutę, o kurioje nors jos vietoje prasidėjusi iškrova greitai išplinta į abi puses išilgai visos vielutės. Taip apie ją labai greitai atsiranda erdvinis teigiamųjų jonų debesėlis, kuris sumažina vielutės sukurto elektrinio lauko stiprumą, ir prasidėjusi iškrova užgęsta. Nutrūkus aktyviai jonizacijai, teigiamųjų jonų debesėlis palyginti iš lėto (jonų masė didelė, o judrumas mažas) plečiasi spindulių kryptimi skaitiklio sienelių link. Kai visi jonai pasiekia katodą (po $10^{-5}$–$10^{-4}$ s), vielutė per varžą *R* įsikrauna iki pradinio potencialo, ir skaitiklis vėl gali registruoti naują dalelę.

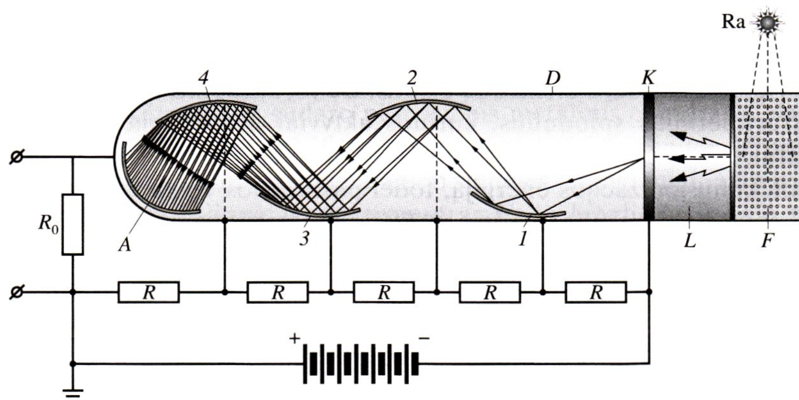
Taigi spirito garai, absorbuodami fotonus, trukdo jiems pasiekti skaitiklio katodą, išmušti iš jo elektronus ir sukelti pakartotinę iškrovą, todėl į skaitiklį įlėkusi elektringoji dalelė sukelia tik vieną trumpalaikę iškrovą. Geigerio ir Miulerio skaitikliu galima užregistruoti visas elektringąsias daleles, kurios praskrieja pro jį vidutiniškai kas $10^{-4}$ s, t. y. apie $10^4$ dalelių per sekundę.

γ fotonų jonizacijos galia labai maža, todėl jie gali praskrieti skaitiklį, nesukūrę nė vienos jonų poros. Nors γ fotonai gali išlaisvinti iš skaitiklio sienelių ar dujų atomų elektronus, kurie sukelia dujų jonizaciją, bet šio efekto tikimybė yra maža. Dėl šių priežasčių Geigerio ir Miulerio skaitikliai užregistruoja tik 1–2% pro juos praskriejusių γ fotonų.

Lėtiesiems neutronams registruoti skaitiklio sienelės iš vidaus padengiamos medžiagomis, turinčiomis boro, arba skaitiklis užpildomas dujomis, kurių sudėtyje

yra boro (pvz., $BF_3$). Boro atomų branduoliai aktyviai absorbuoja lėtuosius neutronus ir išspinduliuoja α daleles, kurios sukelia jonizaciją. Greitieji neutronai susekami iš jonizacijos, kurią sukelia jų išmušti protonai. Šiuo tikslu sienelės padengiamos medžiagomis, turinčiomis daug vandenilio (pvz., parafinu) arba skaitiklis užpildomas metano ar propano dujomis.

**3. Scintiliãcinis (blyksnìnis) skaitìklis.** Greitosios dalelės ir fotonai, smogdami į fluorescuojančias medžiagas, sukelia silpnus, plika akimi pastebimus, blykstelėjimus – *scintiliãcijas*. Dalelė sukelia tik vieną scintiliaciją; vadinasi, jas suskaičiavus, sužinomas dalelių skaičius. Išradus *fotodaugintuvùs*, buvo sukonstruoti scintiliaciniai skaitikliai (345 pav.). Fotodaugintuvą sudaro vakuuminis stiklo vamzdis *D*, kuriame įtaisytas fotokatodas *K*, anodas *A* ir keletas *dinòdų* (emiterių) (*1*, *2*, *3*, *4*). Per įtampos daliklį, sudarytą iš nuosekliai sujungtų varžų *R*, prijungus



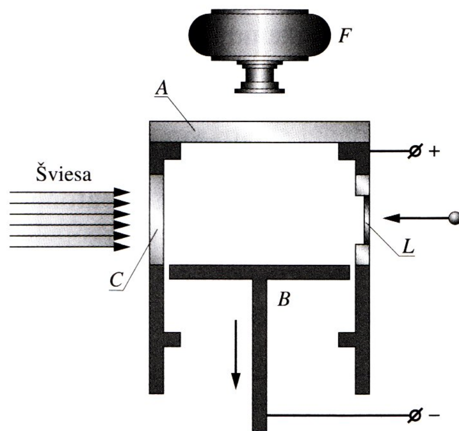

345 pav.

aukštos įtampos nuolatinės srovės šaltinį, tarp elektrodų sudaroma 100–150 V įtampa. Fotokatodas *K* – tai mažo elektronų išlaisvinimo darbo metalo pusiau skaidrus sluoksnelis, kuriuo padengta vidinė vamzdelio galo pusė. Greita dalelė, įlėkusi į skaitiklį, sužadina atomus ir sukelia scintiliaciją. Šviesos kvantai pro šviesolaidį *L* (pvz., organinį stiklą) patenka į fotokatodą *K* ir išstumia iš jo elektronus, kurie įgreitinti elektrinio lauko, atsitrenkia į dinodo *1* paviršių ir kiekvienas išmuša po 2–3 naujus elektronus. Pastarieji, įgreitinti elektrinio lauko tarp pirmojo ir antrojo dinodo, išmuša naujus elektronus iš antrojo dinodo ir t. t. Taip anodą pasiekia didžiulis skaičius elektronų, kurie sumažina jo potencialą. Potencialo pokytis sustiprinamas ir užregistruojamas elektromagnetiniu skaitikliu. Elektronų krūviui nutekėjus pro varžą $R_0$, anodas vėl įgyja pradinį potencialą ir skaitiklis gali registruoti naują dalelę.

Scintiliacinio skaitiklio registravimo greitis priklauso nuo fluorescuojančiosios medžiagos prigimties ir siekia $10^5$–$10^9$ dalelių per sekundę. Be to, šie skaitikliai gana efektyviai (iki 60–80%) registruoja γ fotonus. Scintiliaciniu skaitikliu galima nustatyti ir dalelės energiją, nes fotodaugintuvo anodo potencialo pokytis priklauso nuo blyksnių stiprio, o pastarasis yra proporcingas dalelės energijai.

**4. Fotoplokštẽlės.** Fotoplokštelių emulsiją sudaro želatinos ir sidabro bromido ($AgBr$) kristalėlių mišinys. Radioaktyvieji spinduliai, kaip ir šviesa, jonizuoja sidabro atomus, kurie, ryškinant plokštelę, iš emulsijos kristalėlių pereina į ryškalą. Dėl to kristalėliai patamsėja. Toks fotocheminis spindulių veikimas naudojamas tiriant radioaktyviųjų medžiagų pasiskirstymą įvairiuose kūnuose. Tuo tikslu daromi kūno ar atskirų jo dalių *radioautogrãfai*. Pavyzdžiui, norint sužinoti, kurioje augalo lapo vietoje susikaupia radioaktyviojo elemento izotopas, kuriuo buvo patręštas augalas, lapas prispaudžiamas prie fotoplokštelės; po tam tikro laiko ji išryškinama ir gaunamas lapo radioautografas; tamsesnės jo vietos atitinka didesnį izotopo kiekį. Geigerio ir Miulerio bei scintiliaciniais skaitikliais tokių tyrimų atlikti negalima, nes jie registruoja palyginti didelės kūno dalies spinduliuotę. Radioautografais galima nustatyti izotopų buvimo vietą atskiruose audiniuose, ląstelių grupėse ar net ląstelėje.

Didelės energijos dalelėms ir jų sąveikai tirti rusų fizikai L. Misovskis ir A. Ždanovas pirmieji panaudojo storo emulsijos sluoksnio (iki 2 mm) fotoplokšteles. Išryškinus plokštelę, pro mikroskopą matomi dalelių pėdsakai.



346 pav.

**5. Vìlsono kãmera**. 1912 m. Č. Vilsonas, pastebėjęs, kad apie dujų jonus, kuriuos sukuria $\alpha$ dalelė, kondensuojasi sotieji vandens garai, šiuo principu sukonstravo dalelių stebėjimo kamerą. Vilsono kamera plačiai naudojama tiriant elementariųjų dalelių savybes ir jų sąveiką su atomų branduoliais. Ją sudaro cilindras *C* su stūmokliu *B* (346 pav.). Cilindro viršus sandariai uždengtas permatomu stiklu *A*, o jo viduje yra švarus oras, prisotintas vandens ir spirito garų mišinio. Staigiai patraukus stūmoklį žemyn, kameroje esantis oras adiabatiškai išsiplečia, todėl jo temperatūra nukrinta. Garai, sotinę orą, žemesnėje temperatūroje jį persotina. Jei šiuo momentu pro žėručio langelį *L* į kamerą įlekia elektringoji dalelė, tai ant jos jonizuotų oro molekulių aktyviai kondensuojasi garai. Iš šono apšviestoje kameroje pro viršutinį stiklą matomas dalelės skriejimo takas – *pėdsakas*, kurį sudaro smulkūs skysčio lašeliai. Dalelių pėdsakai paprastai yra fotografuojami, nes jų lašeliai, veikiami sunkio jėgos bei molekulių šiluminio judėjimo, per trumpą laiką (0,1–1 s) išplinta. Tenka pastebėti, kad oras visada yra truputį jonizuotas. Šie pašaliniai kondensacijos centrai, prieš patraukiant stūmoklį žemyn, nusodinami ant kameros sienelių elektriniu lauku, kuris sudaromas tarp metalinių kameros dalių.

$\alpha$ dalelių jonizacijos geba yra didesnė negu $\beta$ dalelių, todėl jų pėdsakai būna storesni ir trumpesni, o $\beta$ dalelių – plonesni, ilgesni ir netaisyklingos formos. Iš pėdsako galima spręsti apie jonizuojančios dalelės prigimtį ir energiją. Rusų fizikas D. Skobelcynas Vilsono kameroje sudarė lygiagretų cilindro ašiai magnetinį lauką. Šiuo atveju elektringąsias daleles veikia Lorenco jėga, todėl jų pėdsakai užlinksta. Išmatavus tako kreivumo spindulį, galima nustatyti dalelės masę, krūvį, energiją.

K. Andersonas, tyrinėdamas kosminius spindulius, Vilsono kameroje pastebėjo pėdsaką, būdingą elektronui, tačiau magnetiniame lauke išlinkusį į priešingą pusę. Taip buvo atrastas *pozitrònas*.

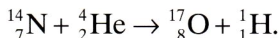
**6. Purslų̃, arba burbulìnė, kãmera.** Šią kamerą 1952 m. išrado D. Glazeris. Ji veikia panašiu principu, kaip ir Vilsono kamera, tik čia persotintieji garai pakeisti skaidriu perkaitintuoju skysčiu (tai reiškia, kad išorinis slėgis mažesnis už skysčio sočiųjų garų slėgį). Purslų kameroje skysčio temperatūra yra aukštesnė už jo virimo temperatūrą, bet skystis neverda, nes paviršių liečiantis stūmoklis arba membrana laiko skystį suslėgtą. Staigiai sumažinus slėgį, skystis perkaista ir tam tikrą trumpą laikotarpį (iki kelių mikrosekundžių) yra metastabiliosios būsenos (turi virti, bet neverda). Jei šiuo momentu pro kamerą pralekia jonizuojančioji dalelė, tai ji priverčia siaurą skysčio sritį išilgai savo kelio staigiai užvirti. Susidaro grandinėlė smulkių garo pūslelių, kurios greitai didėja ir pasidaro regimos. Pūslelių plėtimosi iki dydžio, tinkamo fotografuoti, laikas priklauso nuo skysčio prigimties ir yra lygus nuo 0,5 ms iki 15 ms. Kameros gali būti pripildytos skysto vandenilio, propano ($C_3H_8$), freonų šeimos skysčių ($CClF_3$, $CCl_2F_2$) ir kt. Jų tūris kartais siekia 1000 l.

Kadangi skystis yra tanki aplinka, tai dalelės jame nuskrieja palyginti trumpą kelią. Todėl purslų kamera galima tyrinėti didelės energijos daleles ir jų sąveiką su kamerą užpildančio skysčio atomų branduoliais. Vilsono kamerą tokios dalelės laisvai praskrieja ir todėl visas pėdsakas nematomas.

## 153. Urano branduolių dalijimasis

Dalelės ir atomo branduolio sąveika, dėl kurios šis branduolys išskiria antrines daleles arba gama kvantus ir virsta nauju branduoliu, vadinama *branduolinė reãkcija*.

1919 m. Rezerfordas įvykdė pirmąją branduolinę reakciją. Jis pastebėjo, kad, alfa dalelėms susiduriant su azoto atomo branduoliais, atsiranda greitai judantys protonai. Tai reiškia, kad azoto izotopo ${}^{14}_{7}N$ branduolys, susidūręs su alfa dalele ${}^{4}_{2}He$, virsta deguonies izotopo ${}^{17}_{8}O$ branduoliu:



$$ {}^{14}_{7}N + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}H. $$

*Vykstant branduolinėms reakcijoms, energija gali būti išskiriama arba sugeriama.* Branduolinės reakcijos energijos išeigą (ryšio energiją) $\Delta E$ galima apskaičiuoti taikant masės ir energijos sąryšio dėsnį. Reikia tik rasti reakcijoje dalyvaujančių dalelių ir reakcijos produktų masių skirtumą $\Delta m$. Tuomet $\Delta E = \Delta mc^2$.

Tarp įvairių branduolinių reakcijų pačios svarbiausios yra grandininės reakcijos, t. y. kai kurių sunkiųjų elementų branduolių dalijimosi reakcijos.

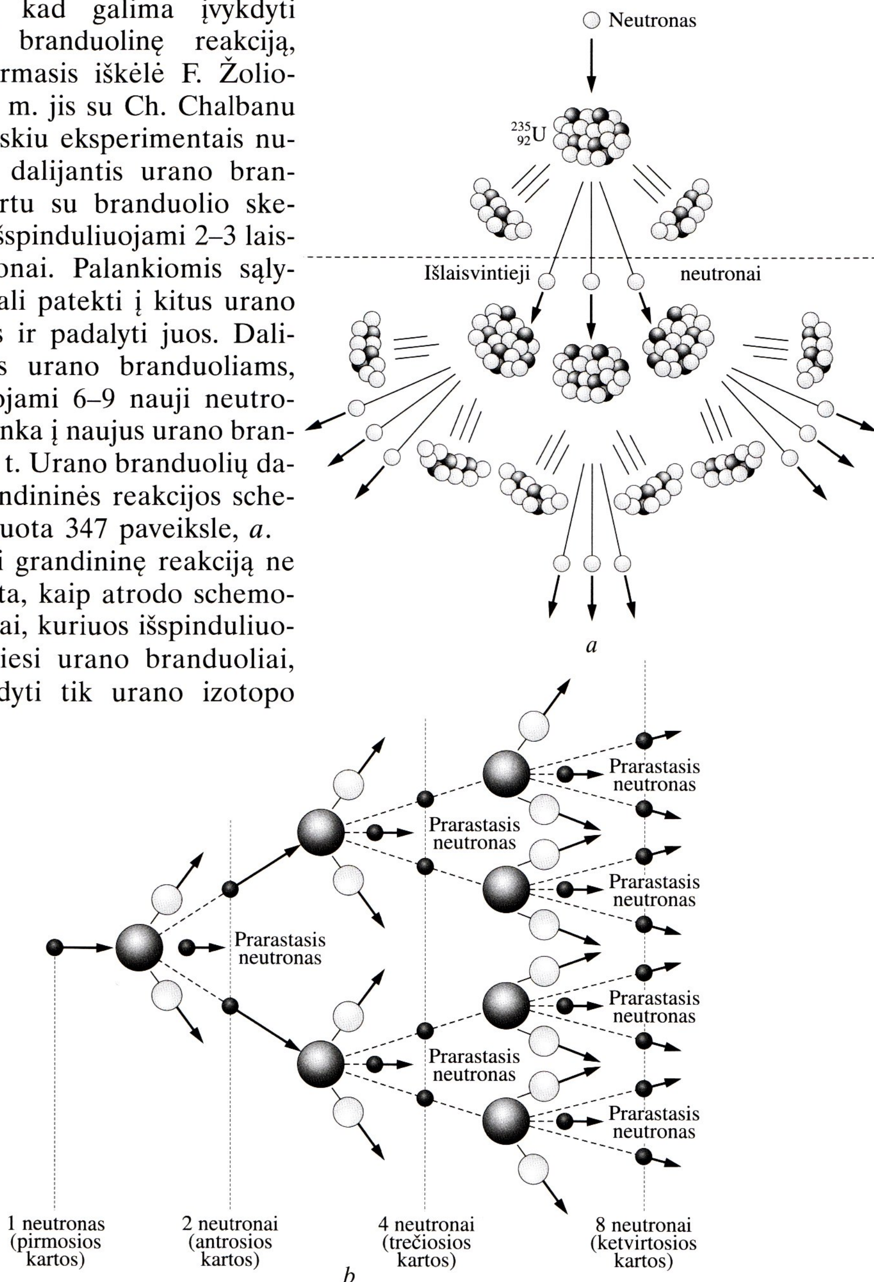
1939 m. buvo atrasta neutronais apšaudytų urano branduolių dalijimosi reakcija. Remiantis eksperimentiniais ir teoriniais bandymais, kuriuos atliko E. Fermis (*Fermi*), I. Žolio-Kiuri, O. Hanas (*Hahn*), F. Štrasmanas, L. Meitner, O. Frišas (*Frisch*), F. Žolio-Kiuri, nustatyta, kad, absorbavęs vieną neutroną, urano branduolys pasidalija į dvi ar tris dalis.

Dalijantis vienam urano branduoliui, išsiskiria maždaug 200 MeV energijos. Apytiksliai 165 MeV sudaro branuolių skeveldrų kinetinė energija, o kita energijos dalis tenka gama kvantams.

Žinant energiją, kuri išsiskiria dalijantis vienam urano branduoliui, galima apskaičiuoti, kiek jos išsiskirs dalijantis visiems 1 kg urano branduoliams. Ši energija sudaro 80 tūkstančių milijardų džaulių. Tai keletą milijonų kartų daugiau, negu jos išsiskiria sudegus 1 kg akmens anglių arba naftos! Todėl buvo ieškoma būdų, kaip gauti didelius kiekius branduolinės energijos ir ją panaudoti praktiniais tikslais.

Mintį, kad galima įvykdyti grandininę branduolinę reakciją, 1934 m. pirmasis iškėlė F. Žolio-Kiuri. 1939 m. jis su Ch. Chalbanu ir L. Kovarskiu eksperimentais nustatė, kad, dalijantis urano branduoliui, kartu su branduolio skeveldromis išspinduliuojami 2–3 laisvieji neutronai. Palankiomis sąlygomis jie gali patekti į kitus urano branduolius ir padalyti juos. Dalijantis trims urano branduoliams, išspinduliuojami 6–9 nauji neutronai, jie patenka į naujus urano branduolius ir t. t. Urano branduolių dalijimosi grandininės reakcijos schema pavaizduota 347 paveiksle, *a*.

Sukelti grandininę reakciją ne taip paprasta, kaip atrodo schemoje. Neutronai, kuriuos išspinduliuoja dalydamiesi urano branduoliai, gali suskaidyti tik urano izotopo




347 pav.

$^{235}_{92}U$ branduolius, o urano izotopo $^{238}_{92}U$ branduoliams suskaidyti jų energijos nepakanka. Gamtiniame urane yra 99,3% urano, kurio masės skaičius 238, ir tik 7% urano, kurio masės skaičius 235. Todėl, norint sukelti grandininę dalijimosi reakciją, pirmiausia reikia atskirti urano izotopus ir gauti didelį kiekį gryno izotopo $^{235}_{92}U$. Būtina grandininės reakcijos sąlyga – pakankamai didelis urano kiekis, nes mažuose bandiniuose dauguma neutronų pralekia nepataikydami nė į vieną branduolį. **Mažiausia urano masė, kuriai esant dar gali vykti grandininė reakcija, vadinama krìtine masè.** Urano $^{235}_{92}U$ kritinė masė lygi maždaug 50 kg (tai – tik 20 cm skersmens rutulys), plutonio – 10 kg.

Branduolinio kuro kritinę masę galima sumažinti, apsupus branduolinį kurą *neutrònų reflèktoriumi* – gerai neutronus atspindinčia medžiaga, pavyzdžiui, grafitu arba beriliu. Reflektorius grąžina atgal iš urano išlekiančius neutronus ir sustiprina reakciją.

Grandininę urano $^{235}_{92}U$ reakciją paprasčiausia sukelti taip. Paruošiami du urano metalo gabalai, kurių kiekvieno masė šiek tiek mažesnė už kritinę. Grandininė reakcija kiekviename jų atskirai vykti negali. Šiuos gabalus staigiai suglaudus, prasideda grandininė reakcija ir išsiskiria milžiniškas energijos kiekis. Urano temperatūra pasiekia milijonus laipsnių, pats uranas ir bet kurios kitos netoliese esančios medžiagos virsta garais. Įkaitusių dujų rutulys staigiai plečiasi, degindamas ir griaudamas viską savo kelyje. Taip vyksta branduolinis sprogimas (347 pav., *b*).

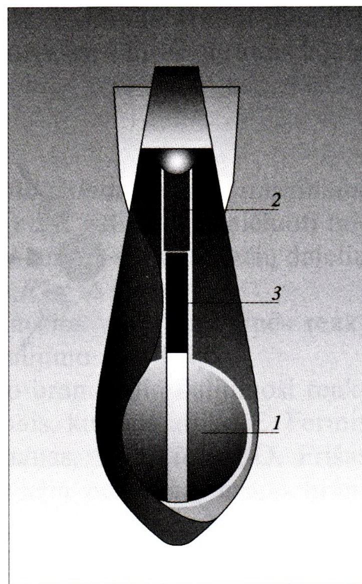
Tokiu principu susprogdinama *atòminė bomba* (348 pav.). Bombos viduje esantis uranas perskirtas į dvi dalis (*1*), kurių kiekvienos masė mažesnė negu kritinė, o abiejų drauge – didesnė. Kai sprogdiklis (*2*) į tarpą tarp atominio užtaiso dalių įmuša urano pleištą (*3*), masė tampa didesnė už kritinę ir bomba sprogsta. Kad grandininė reakcija vyktų labai greitai, bomboms naudojamas grynas uranas-235 arba dirbtinis radioaktyvusis elementas plutonis $^{239}_{94}Pu$.

Sprogus bombai, išsilaisvina milžiniška energija ir aplinkos temperatūra pakyla iki kelių milijonų laipsnių. Sprogimo metu spėja sureaguoti maždaug 5% atominio kuro. Kita jo dalis išsisklaido, užteršdama atmosferą ir žemės paviršių radioaktyviomis medžiagomis.

Grandininės reakcijos plėtojimąsi galima valdyti – pagreitinti arba sulėtinti, t. y. pasiekti, kad ji vyktų stabiliai, o ne sprogimu. Šiuo tikslu branduolinio kuro masė perveriama strypais iš tokios medžiagos (kadmio arba boro), kuri smarkiai absorbuoja neutronus. Ištraukiant arba giliau įleidžiant strypus, reguliuojamas reakcijoje dalyvaujančių neutronų skaičius, taigi ir reakcijos greitis.

1942 m. JAV pirmą kartą valdomą grandininę reakciją sukėlė italų fizikas Enrikas Fermis (*Fermi*; 1901–1954).

1946 m. valdomą grandininę reakciją buvusioje Sovietų Sąjungoje įvykdė fizikų kolektyvas, vadovaujamas Igorio Kurčiatovo (1903–1960).

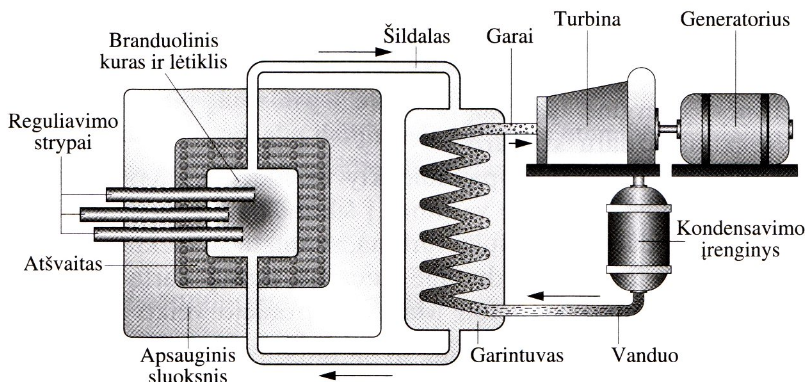



348 pav.

# 154. Branduolinis reaktorius. Branduolinė energetika

**Valdomos urano branduolio dalijimosi grandininės reakcijos sukeliamos branduolìniuose reãktoriuose.**

Pirmieji branduoliniai reaktoriai buvo *lėtų̃jų neutrònų reãktoriai* (349 pav.). Dauguma neutronų, išlekiančių dalijantis urano branduoliams, turi 1–2 MeV energijos. Jų greitis apytiksliai lygus $10^7$ m/s, todėl jie vadinami *greitaisiais neutronais*. Tokios energijos neutronai sąveikauja su urano $^{235}_{92}U$ ir urano $^{238}_{92}U$ branduoliais vienodai efektyviai. Kadangi urano $^{238}_{92}U$ branduolių gamtiniame urane yra 140 kartų daugiau negu urano $^{235}_{92}U$ branduolių, didelę šių neutronų dalį sugeria $^{238}_{92}U$ ir grandininė reakcija nevyksta. **Neutronai, kurių greitis artimas šiluminio judėjimo greičiui (apie 2 · $10^3$ m/s), vadinami lėtaĩsiais, arba šilumìniais.** Lėtieji neutronai




349 pav.

gerai sąveikauja su urano $^{235}_{92}U$ branduoliais, kurie juos sugeria 500 kartų efektyviau negu greituosius neutronus. Todėl gamtinį uraną švitinant lėtaisiais neutronais, didelę jų dalį sugeria ne urano $^{238}_{92}U$, o urano $^{235}_{92}U$ branduoliai, kurie ir dalijasi. Vadinasi, kad vyktų gamtinio urano grandininė reakcija, neutronų greitį reikia sumažinti iki šiluminio judėjimo greičio.

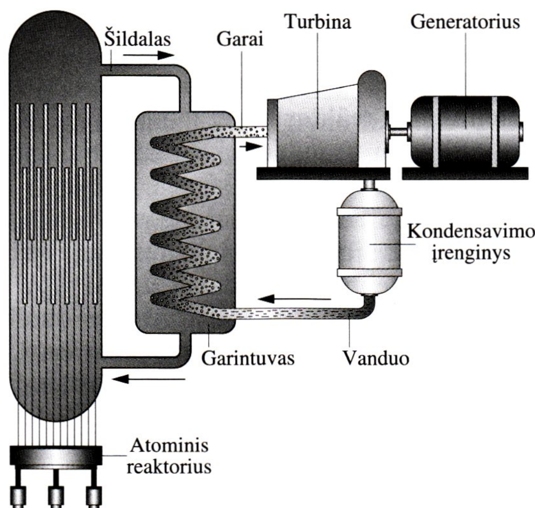
Neutronai lėtėja susidurdami su aplinkos, kurioje jie juda, atomų branduoliais. Reaktoriuje neutronus lėtina speciali medžiaga, vadinama *lėtikliù*. Lėtiklio atomų branduolių masė turi būti palyginti nedidelė, nes, susidurdamas su lengvuoju branduoliu, neutronas praranda daugiau energijos negu susidurdamas su sunkiuoju branduoliu. Labiausiai paplitę lėtikliai yra paprastas vanduo ir grafitas.

**Erdvė, kurioje vyksta grandininė reakcija, vadinama reáktoriaus aktyviája zonà.** Norint sumažinti neutronų nutekėjimą, reaktoriaus aktyvioji zona apsupama *neutrònų átšvaitu*, kuris didelę dalį išlekiančių neutronų grąžina į aktyviąją zoną. Atšvaitui ir lėtikliui dažniausiai naudojama ta pati medžiaga.

Veikiančiame reaktoriuje išsiskiriančią energiją perneša *šil̃dalas*. Juo gali būti tik skysčiai ir dujos, nesugeriančios neutronų. Kaip šildalas dažnai naudojamas paprastas vanduo, kartais – anglies dioksidas ir net skystas metalinis natris.

Reaktorius valdomas specialiais valdymo (arba reguliavimo) strypais, kurie įstumiami į aktyviąją reaktoriaus zoną. Šie strypai gaminami iš boro arba kadmio

junginių, labai efektyviai sugeriančių šiluminius neutronus. Prieš pradedant veikti reaktoriui, strypai visiškai įstumiami į jo aktyviąją zoną. Sugerdami didelę dalį neutronų, jie neleidžia sukelti grandininės reakcijos. Norint paleisti reaktorių, reguliavimo strypus reikia iš lėto traukti iš aktyviosios zonos, kol išsiskirs tam tikras energijos kiekis. Galiai padidėjus iki nustatyto lygio, įjungiami automatai, įstumiantys reguliavimo strypus giliau į aktyviąją zoną.



350 pav.

*Atòminis reãktorius, gãro turbinà* ir *elèktros generãtorius* sudaro atominės elektrinės energinę sistemą (350 pav.). Tekantis uždaru kontūru per reaktorių šildalas (vanduo) tampa radioaktyvus, todėl jis naudojamas tik antrojo kontūro vandeniui šildyti. Siurblio varomas į šilumokaitį šildalas atiduoda šilumą vandeniui garinti. Susidaręs garas suka turbiną, sujungtą su elektros generatoriumi.

1954 m. birželio 27 d. branduolinė energija pirmą kartą buvo panaudota taikiems tikslams – Obniñske (netoli Maskvõs) pradėjo veikti pirmoji pasaulyje 5000 kW galios atominė elektrinė.

Šiuo metu stambiausių atominių elektrinių galia siekia 4000 MW, t. y. ji 800 kartų didesnė už pirmosios AE galią. Stambiose atominėse elektrinėse gaminamos elektros energijos savikaina mažesnė už šiluminių elektrinių elektros energijos savikainą.

Branduoliniai reaktoriai plačiai naudojami jūrų laivų jėgainėms. Pirmasis pasaulyje taikus laivas su branduoline jėgaine (atominis ledlaužis) buvo pastatytas 1959 m. Sovietų Sąjungoje.

Atominis ledlaužis „Arktika“ – pirmasis pasaulyje antvandeninis laivas, 1975 m. pasiekęs Šiaurės polių.

Iš termodinamikos kurso žinome, kad šiluminės elektrinės išmeta į aplinką milžiniškus kiekius sieros junginių, anglies monoksido, azoto oksidų ir kitokių kenksmingų medžiagų, taigi labai teršia aplinką. Atominės elektrinės šiuo požiūriu mažiau kenksmingos aplinkai ir žmogui. Tačiau radioaktyviosios medžiagos, liekančios branduoliniame kure ir susidarančios aktyviojoje reaktoriaus zonoje kelia grėsmę (ypač avarijos atveju). Todėl saugus atominių elektrinių darbas – pasaulinės svarbos problema. Pasaulio praktika rodo, kad ji išsprendžiama.

Ignalinos atominėje elektrinėje (AE) sumontuoti du reaktoriai, kurių kiekvieno galia 1 mln. kW. Reaktorius su dviem turbinomis ir dviem 500 000 kW generatoriais sudaro vieną AE bloką.

Atominėse elektrinėse tik trečdalis išsiskiriančios energijos virsta elektra. Kitą energijos dalį išneša aušinantis vanduo. Ignalinos AE aušinančio vandens baseinas yra didžiausias Lietuvoje Drūkšių ežeras (49 km$^2$ ploto).

Per metus kiekvienas Ignalinos AE reaktorius suvartoja vos po kelis vagonus branduolinio kuro. Tokios galios šiluminei elektrinei per metus reikėtų apie 70 000 vagonų akmens anglių.

## Klausimai ir užduotys

**1. Kad betonas geriau apsaugotų nuo radioaktyviosios spinduliuotės, į jį įmaišoma boro ir ličio turinčių medžiagų, pvz., boro karbido $B_4C$, ličio chlorido LiCl. Kodėl toks betonas saugo geriau?**

**2. Kodėl medžiagos, esančios periodinės elementų lentelės viduryje ir gale, nenaudojamos neutronams lėtinti? Atsakymą pagrįskite.**

**3. Kokios branduolinės reakcijos vyksta urano reaktoriuje, susidarant plutoniui $^{239}_{94}Pu$? Parašykite jų lygtis.**

**4. Dalijantis $^{235}_{92}U$ branduoliui, išsiskiria energija. Kuri masė – urano branduolio rimties ar susidariusių skeveldrų – didesnė? Kodėl?**

**5. Kurių izotopų branduolių dalijimasis taikomas atominių jėgainių reaktoriuose?**

**6. Kokią įtaką neutronų daugėjimo koeficientui turi aktyviosios zonos išklojimas anglimi? Atsakymą pagrįskite.**

# 155. Termobranduolinė energija

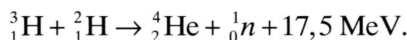
*Branduolinė energija išsiskiria ne tik dalijantis sunkiesiems branduoliams, bet ir susijungiant lengvųjų atomų branduoliams.*

Nagrinėdami atomų branduolių ryšio energiją (§ 148) sužinojome, kad, susidarant branduoliui, iš atskirų nukleonų turi išsiskirti energijos kiekis, lygus ryšio energijai. Išsiskiria energija ir jungiantis lengviesiems branduoliams į sunkesnį.

**Reakcija, kurios metu du lengvieji branduoliai susijungia į naują branduolį, vadinama branduolinė siñtezės reãkcija.**

Kad galėtų susijungti vienarūšius krūvius turintys protonai, reikia nugalėti elektrostatines stūmos jėgas. Tai gali įvykti, kai susiduriančių dalelių judėjimo greitis yra pakankamai didelis. Tinkamos sąlygos helio branduoliams susidaryti iš protonų yra žvaigždžių gelmėse ir yra svarbiausias jų energijos šaltinis. Žemėje vykstanti branduolinė sintezės reakcija sukelia termobranduolinį sprogimą.

Iš lengvųjų vandenilio izotopų helis susidaro maždaug $10^8$ K temperatūroje, o iš sunkiųjų vandenilio izotopų – deuterio ir tričio – apytiksliai $5 \cdot 10^7$ K temperatūroje, vykstant tokiai sintezės reakcijai:



$$^3_1H + ^2_1H \rightarrow ^4_2He + ^1_0n + 17{,}5\ \text{MeV}.$$

Kai iš deuterio ir tričio susidaro 1 g helio, išsiskiria $4{,}2 \cdot 10^{11}$ J energijos. Tiek jos išsiskiria ir sudegus 10 tonų dyzelinio kuro.

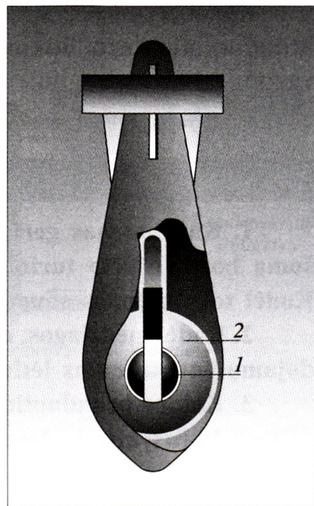
Kad vyktų sintezės reakcija, branduoliai turi suartėti iki tokio atstumo, kokiame pradeda veikti branduolinės jėgos, t. y. iki $2 \cdot 10^{-15}$ m. Branduolių suartėjimui priešinasi elektrostatinės stūmos jėgos, todėl branduoliai turi susidurti turėdami

labai didelę kinetinę energiją, kurią jie įgyja tik esant labai aukštai temperatūrai. **Branduolių sintezės reakcijos, vykstančios aukštoje temperatūroje, vadinamos termobranduolìnėmis reãkcijomis.**

Kad deuteris ir tritis jungtųsi į helį, jų mišinys turi įkaisti iki milijonų laipsnių. Tokia temperatūra Žemės sąlygomis susidaro tik sprogstant atominei bombai.

Vandenilinė bomba (351 pav.) yra sudaryta iš atominės bombos (*1*) ir termobranduolinio užtaiso – vandenilio izotopų mišinio (*2*). Sprogus atominei bombai, susidaro sąlygos vandenilio izotopų sintezei.

Termobranduolinis užtaisas gali būti kiek norima didelis, todėl vandenilinių bombų sprogimo galia neribota.



351 pav.

Vandenilio atsargos Žemėje yra beveik neišsenkamos, todėl termobranduolinės sintezės energijos panaudojimas taikiems tikslams yra vienas pagrindinių šiuolaikinio mokslo bei technikos uždavinių.

Jau keletą dešimtmečių viso pasaulio mokslininkai intensyviai ieško būdų valdomai termobranduolinei reakcijai vykdyti. Jai būtiną aukštą temperatūrą galima sukurti naudojant galingą elektros iškrovą. Svarbiausia kliūtis, trukdanti įgyvendinti šią idėją, yra ta, kad dešimčių milijonų laipsnių temperatūroje staiga išgaruoja visos medžiagos. Todėl plazmą būtina bent dalį sekundės sulaikyti, neleisti jai plėstis ir susiliesti su reaktoriaus sienelėmis. Rusų mokslininkai Aleksandras Sacharovas ir Igoris Tamas pasiūlė efektyvų būdą plazmai izoliuoti labai stipriais specialios konfigūracijos magnetiniais laukais. Eksperimentiniame įrenginyje „Tokamakas-10“ jiems pavyko įkaitinti plazmą iki 13 mln. laipsnių temperatūros. Ieškoma ir kitokių techninių sprendimų. Vienas iš jų – staigiai pakelti temperatūrą iki milijonų laipsnių mažose erdvės srityse trumpais galingais lazerio spindulio blyksniais. Tikimasi, kad termobranduoliniai reaktoriai bus sukurti jau netolimoje ateityje.

Vandenilio izotopų sintezės reakcijos taptų neišsenkamu energijos šaltiniu. Užtenka paminėti, kad susijungus deuteriui, esančiam viename litre paprasto vandens, išsiskirtų tiek pat energijos, kiek jos išsiskiria sudeginus 350 l benzino.

## Klausimai ir užduotys

1. **Kuo skiriasi grandininė branduolinė reakcija ir termobranduolinė reakcija?**
2. **Parašykite referatą tema „Ignalinos atominė elektrinė“.**
3. **Parašykite referatą tema „Atominė energetika ir ekologija“.**

# 24 SKYRIUS. ELEMENTARIOSIOS DALELĖS

## 156. Svarbiausia elementariųjų dalelių savybė. Pozitrono atradimas

Aristotelio laikais buvo manoma, kad visą materialųjį pasaulį sudaro keturios pagrindinės substancijos – žemė, oras, ugnis ir vanduo. Tai buvo savotiškos gamtos „elementariosios dalelės". Mūsų amžiaus ketvirtojo dešimtmečio pradžioje šiuolaikiniam mokslui pavyko pateikti įtikinamesnį medžiagos sandaros aprašymą, pagrįstą keturių rūšių elementariosiomis dalelėmis – protonais, neutronais, elektronais ir fotonais. Tai buvo nuostabiai paprasta ir patraukli schema: remiantis tik keturių rūšių elementariosiomis dalelėmis, pagal kvantinės mechanikos dėsnius įmanoma paaiškinti cheminių elementų, jų junginių ir jų skleidžiamų spindulių prigimtį. Pridėjus penktąją dalelę – neutriną, pasisekė paaiškinti ir radioaktyvaus skilimo procesus.

**Elementariósiomis dalẽlėmis vadinamos mažiausios nedalomos materijos dalelės, kurios visuose procesuose dalyvauja kaip nedalomi vienetai.** Net susidūrus didelės energijos dalelėms, jos nesutrupa į sudėtines dalis, bet virsta kitomis, žinomomis arba naujai atrandamomis elementariosiomis dalelėmis. Dalelių tarpusavio virsmai apgręžiami: jeigu, pavyzdžiui, kuri nors dalelė skyla į dvi daleles, tai iš tos dalelių poros gali susidaryti pradinė dalelė.

Kiekviena elementarioji dalelė gali virsti kita ar kitomis dalelėmis. Šie virsmai – kai kurių elementariųjų dalelių egzistavimo įrodymas. Kaip chemines reakcijas valdo elektronų ir jonų elektromagnetinė sąveika, o branduolines reakcijas – jau minėta stiprioji sąveika, taip dalelių virsmus valdo dar naujos rūšies sąveika, vadinama *silpnája są̃veika*. Taigi elementariosios dalelės virsmai vyksta silpnosios sąveikos lauke. Šiandien mokslui **žinomos keturių rūšių sąveikos, lemiančios visą begalinę vykstančių procesų įvairovę: gravitacinė, elektromagnetinė, stiprioji (branduolinė) ir silpnoji.**

Pradėjus tirti kosminius spindulius, buvo išaiškintos naujos elementariosios dalelės. Nepraėjus nė metams nuo neutrono atradimo, 1932 m. JAV fizikas Karlas Andersonas kosminiuose spinduliuose aptiko nežinomą teigiamąją dalelę, kurios masė ir elektros krūvio absoliučioji vertė buvo tiksliai tokia pat, kaip elektrono, bet krūvio ženklas – teigiamas. Andersonas šią dalelę pavadino *pozitronù*, t. y. teigiamu elektronu, kurį žymime $e^+$ arba $\beta^+$.

**Magnetiniame arba elektriniame lauke pozitrònas ir elektrònas nukrypsta į priešingas puses.**

1936 m. už pozitrono atradimą K. Andersonas (kartu su V. Hesu (*Hess*)) apdovanotas Nobelio premija.

## 157. Elementariųjų dalelių klasifikacija

Vykstant β skilimui, neutronas išmeta elektroną ir virsta protonu. Tikslūs skaičiavimai parodė, kad šios reakcijos metu dingsta masė, maždaug pusantro karto didesnė už elektrono masę. Toks masės nuostolis yra ekvivalentus 780 000 eV energijai. Tačiau nei masės, nei energijos pėdsakų aptikti nepavyko. Imta net abejoti energijos tvermės dėsnio visuotinumu. 1930 m. šveicarų fizikas Volfgangas Paulis paskelbė hipotezę, kad β skilimo metu, be elektrono, išlekia dar viena dalelė, neturinti nei krūvio, nei rimties masės. Toji dalelė ir nusineša trūkstamą energiją.

1933 m. Enrikas Fermis (*Fermi*), remdamasis Paulio hipoteze, sukūrė β skilimo teoriją ir naują dalelę pavadino *neutrinù*. Neutrinas žymimas simboliu ν arba ${}^{0}_{0}\nu$. Jis, kaip ir fotonas, egzistuoja tik skriedamas šviesos greičiu.

$$\beta^{-} \text{ skilimas: } n \rightarrow p + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu}_e; \quad (318)$$

$$\beta^{+} \text{ skilimas: } p \rightarrow n + {}^{0}_{+1}e + \nu_e. \quad (319)$$

Branduolinių reakcijų lygtyse vienoje pusėje esančią dalelę galima pakeisti antidalele kitoje pusėje. Todėl 319 lygtį galima perrašyti šitaip:

$$p + {}^{0}_{-1}e \rightarrow n + \nu_e. \quad (320)$$

Ši lygtis aprašo elektrono pagrobimo procesą.

Panašiai iš 319 lygties galima užrašyti, kad

$$p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + {}^{0}_{+1}e. \quad (321)$$

Kitaip tariant, neutrino išspinduliavimas tolygus antineutrino absorbcijai.

1953 m. JAV fizikai K. Kouenas (*Cowen*) ir F. Reinsas (*Reines*), sukėlę 318 formule aprašytą reakciją, pirmą kartą eksperimentiškai pademonstravo, kad neutrinas egzistuoja. Ši reakcija vyksta dėl silpnųjų sąveikų, todėl tikimybė, kad protonas pagrobs neutriną, nepaprastai maža. Iš tikrųjų iš kiekvienų $10^{12}$ Žemę pasiekiančių neutrinų visi, išskyrus vieną, praeina pro Žemę kiaurai, nesąveikaudami. Neutrinas beveik nesąveikauja su medžiaga, todėl jis nepaprastai skvarbus. Net švine jis nueitų atstumą, lygų 50 šviesmečių! Žemės rutulys ir net Saulė jam skaidrūs, kaip stiklas šviesai! Todėl norint užregistruoti $p + \bar{\nu}_e$ sąveiką, reikia nepaprastai galingo antineutrinų šaltinio. Kounas su Reinsu tam pasirinko branduolinį reaktorių, nes, pasidalijus branduoliams, jų skeveldrose vyksta $\beta^{-}$ skilimas ir išspinduliuojami antineutrinai.

Antineutrinams registruoti K. Kouenas su F. Reinsu pasinaudojo neutrono ir pozitrono reakcijos $p + \bar{\nu}_e$ produktų elgsenos ypatumais. Į detektorių patekus neutronui, vyksta jo pagavimo reakcija ir išspinduliuojamas vienas ar keli didelės energijos kvantai. Pozitronas anihiliuoja su elektronu ir susidaro du 0,51 MeV energijos γ kvantai. Tai, kad su dviejų rūšių γ kvantų pasirodymu susiję įvykiai vyksta tuo pat metu, neabejotinai rodo, jog atsirado neutronas ir pozitronas, t. y. įvyko $p + \bar{\nu}_e$ sąveika. Taip galima registruoti tik antineutrinus. Jei su branduoliu sąveikauja

neutrinas, neutronas jį absorbuoja: $n+\nu_e \rightarrow p+ {}_{-1}^{0}e$. Ir neįmanoma pastebėti įvykio, rodančio, kad vyko reakcija $p+\bar{\nu}_e$.

Rūpestingai atlikę seriją eksperimentų, Kouenas su Reinsu nenuginčijamai įrodė, jog įvyksta antineutrinų sukelti procesai, ir galutinai nustatė, kad neutrinas ir antineutrinas – realios dalelės, o ne fiktyvios sąvokos, įvestos tik tam, kad būtų išgelbėti tvermės dėsniai aiškinant β skilimą.

1947 m. anglų fizikas Sesilis Pauelas (*Powell*), tyrinėdamas kosminių spindulių sukeltas reakcijas, aptiko daleles, kurių rimties masė maždaug 270 kartų didesnė už elektrono masę. Tos dalelės buvo pavadintos π *mezònais*, arba *piònais*.

Pionų rasta trijų rūšių: teigiamųjų $\pi^+$, neigiamųjų $\pi^-$ ir neutraliųjų $\pi^0$.

Keičiantis π mezonais, branduolyje vyksta nuolatinė nukleonų sąveika: protonai atiduoda neutronams teigiamuosius $\pi^+$ mezonus ir virsta neutronais, o pastarieji, absorbuodami $\pi^+$ mezonus, virsta protonais. Analogiškai nukleonai sąveikauja keisdamiesi neigiamaisiais $\pi^-$ mezonais. Taigi π mezonai yra branduolinio lauko kvantai, panašiai kaip fotonai – elektromagnetinio lauko kvantai.

Elektringųjų pionų gyvavimo trukmė vienoda ir lygi $2{,}5 \cdot 10^{-8}$ s, neutraliojo piono – vos apie $10^{-16}$ s.

Už naujų elektringųjų dalelių π mezonų atradimą S. Pauelas 1950 m. apdovanotas Nobelio premija.

Dabar žinomos keturios stabilios elementariosios dalelės (fotonas, elektronas, protonas ir neutrinas), per tris dešimtis palyginti ilgaamžių – gyvuojančių ilgiau kaip $10^{-17}$ s – dalelių, o itin trumpai ($10^{-22}$–$10^{-23}$ s) gyvuojančių dalelių jau atrasta per du šimtus. Atsižvelgiant į rimties masę ir kitas savybes, dalelės skirstomos į keturias grupes (žr. 16 lentelę).

**1. Fotònas** – dalelė, kurios rimties masė ir krūvis lygūs nuliui. Pirmoje grupėje yra tik ši dalelė.

**2. Leptònai** (gr. *leptos* – lengvas) – lengvosios dalelės. Jų žinoma aštuonios. Vieno iš jų – μ mezono masė beveik 207 kartus didesnė už elektrono masę. Vis dėlto jis priskiriamas šiai grupei, nes, kaip ir kiti leptonai, nesąveikauja stipriąja sąveika.

**3. Mezònai** (gr. *mesos* – vidutinis) – tai dalelės, kurių masė svyruoja nuo 260 iki 1100 elektrono masių. Lengvesnieji mezonai vadinami π mezonais, o sunkesnieji – K mezonais, arba kaonais. Visi mezonai yra nestabilūs, jų gyvavimo trukmė nuo $10^{-6}$ iki $10^{-19}$ s. 1977 m. atrasti sunkieji mezonai, vadinami *ipsilònais*.

**4. Bariònai** (gr. *barys* – sunkus) – sunkiųjų dalelių grupė. Ji pati gausiausia. Be jau žinomų protonų ir neutronų, šiai grupei priklauso *hiperònai* (*hiperprotònai*) – nestabilios dalelės, gerokai sunkesnės už protonus. Joms skylant susidaro nukleonai.

Kuo didesnę energiją turi besitrenkiančios viena į kitą įgreitintos greitintuve dalelės, tuo atsirandančių naujų dalelių energijos (kartu ir masės) didesnės.

Elementariųjų dalelių pasaulis stebina virsmų ir kitų procesų įvairove.

Nuo 1964 m. pradėta aiškinti, kad dalelės, **vadinamos elementariosiomis, sudarytos iš dar „elementaresnių“ dalelių, pavadintų kvárkais**. Iš pradžių, pagal kvarkų hipotezę, vos iš trijų kvarkų ir antikvarkų buvo „sudėliota“ dauguma žinomų dalelių,

16 lentelė

**Elementariosios dalelės**

| | Dalelių pavadinimas | Simbolis: dalelės | Simbolis: antidalelės | Masė (elektrono masėmis) | Elektros krūvis | Gyvavimo trukmė, s |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Fotonas | $\gamma$ | $\bar{\gamma}$ | 0 | 0 | stabilus |
| Leptonai | Elektroninis neutinas | $\nu_e$ | $\bar{\nu}_e$ | 0 | 0 | stabilus |
| | Miu mezononis neutrinas | $\nu_\mu$ | $\bar{\nu}_\mu$ | 0 | 0 | stabilus |
| | Elektronas | $e^-$ | $e^+$ | 1 | –1 | stabilus |
| | Miu mezonas | $\mu^-$ | $\mu^+$ | 206,7 | –1 | $22{,}2 \cdot 10^{-6}$ |
| Mezonai | Pi mezonas | $\pi^0$ | $\bar{\pi}^0$ | 264,1 | 0 | $0{,}8 \cdot 10^{-16}$ |
| | | $\pi^+$ | $\pi^-$ | 273,1 | 1 | $2{,}6 \cdot 10^{-8}$ |
| | Ka mezonas | $K^+$ | $K^-$ | 966,4 | 1 | $1{,}23 \cdot 10^{-8}$ |
| | | $K^0$ | $\bar{K}^0$ | 974,1 | 0 | $K_s^0$ – $0{,}86 \cdot 10^{-10}$<br>$K_l^0$ – $5{,}38 \cdot 10^{-8}$ |
| | Eta nilis mezonas | $\eta^0$ | $\bar{\eta}^0$ | 1074 | 0 | $10^{-17}$ |
| Barionai | Protonas | $p$ | $\bar{p}$ | 1836,1 | 1 | stabilus |
| | Neutronas | $n$ | $\bar{n}$ | 1838,6 | 0 | $10^3$ |
| | Liambda hiperonas | $\Lambda^0$ | $\bar{\Lambda}^0$ | 2184,1 | 0 | $2{,}5 \cdot 10^{-10}$ |
| | Sigma hiperonas | $\Sigma^0$ | $\bar{\Sigma}^+$ | 2327,6 | 1 | $0{,}8 \cdot 10^{-10}$ |
| | | $\Sigma^0$ | $\bar{\Sigma}^0$ | 2333,6 | 0 | $10^{-14}$ |
| | | $\Sigma^-$ | $\bar{\Sigma}^-$ | 2343,6 | –1 | $1{,}49 \cdot 10^{-10}$ |
| | Ksi hiperonas | $\Theta^0$ | $\bar{\Theta}^0$ | 2572,8 | 0 | $3{,}03 \cdot 10^{-10}$ |
| | | $\Theta^-$ | $\bar{\Theta}^-$ | 2585,6 | –1 | $1{,}66 \cdot 10^{-10}$ |
| | Omega minus hiperonas | $\Omega^-$ | $\bar{\Omega}^-$ | 3273 | –1 | $1{,}3 \cdot 10^{-10}$ |

numatytos naujos dalelės, kurios vėliau buvo atrastos. Kvarkai – tai neregėtų savybių dalelės – jų elektros krūvis lygus 1/3 arba 2/3 elementariojo krūvio, be to, jų laisvų praktiškai aptikti neįmanoma. Tarpusavio sąveika tarp kvarkų labai stipri, todėl jie neištrūksta iš grupės, sudarančios vieną ar kitą dalelę. Dalelių virsmai – tai tiesiog kvarkų ar antikvarkų perėjimai, dėl kurių susidaro naujos jų kombinacijos.

Elementariųjų dalelių fizikoje yra daug spręstinų problemų, tarp kurių bene svarbiausia – vieningos sąveikos teorijos sukūrimas.

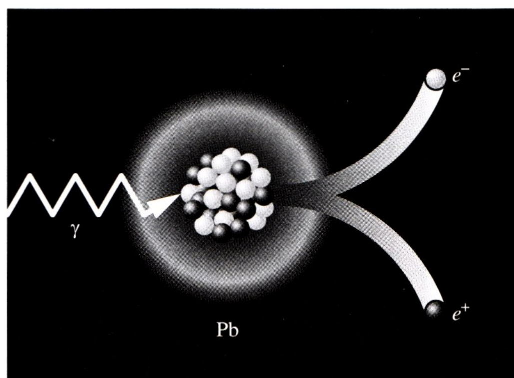
# 158. Antidalelės. Antimedžiaga

16 lentelėje beveik visas daleles atitinka *antidalēlės*. **Dalelių ir antidalelių rimties masė, gyvavimo trukmė ir kai kurios kitos charakteristikos vienodos, o krūviai – vienodo didumo, bet priešingų ženklų.**

**Antidalelės taip vadinamos dėl to, kad bet kuri dalelė, susidūrusi su savo antidalele, anihiliuoja, t. y. abi dalelės „susinaikina“, virsdamos lauko kvantais.** Pavyzdžiui, susidūrus lėtiesiems elektronui ir pozitronui, jie virsta dviem fotonais, kurių kiekvienas turi po 0,5 MeV energijos: $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$.

Anihiliacijos metu išsiskiria 1000 kartų daugiau energijos, negu dalijantis urano branduoliui.

Gamtoje gali vykti ir atvirkščias vyksmas – tam tikromis sąlygomis **didelės energijos kvantai gali virsti medžiagos dalelėmis**. Vilsono kameroje nufotografuotas elektrono ir pozitrono poros gimimas iš γ kvanto, patekusio į stiprų švino branduolio lauką (352 pav.): $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$.



352 pav.

Atomo ir branduolio fizikoje tokių virsmų pavyzdžių žinoma ir daugiau. Visi šie virsmai patvirtina teiginį, kad materija egzistuoja medžiagos ir lauko forma; bet kurios formos materija gali virsti kitos formos materija.

Atradus antidaleles, paaiškėjo, kad gali egzistuoti ir iš jų susidaryti antimedžiagos atomai, pavyzdžiui, antiprotonas ir apie jį skriejantis pozitronas sudarys antivandenilio atomą. Gauti antimedžiagą nepaprastai sunku, nes susilietusi su medžiaga ji kaipmat anihiliuoja. Taigi mūsų planetoje nėra prasmės ieškoti antimedžiagos ir iš jos sudarytų antipasaulių. Galima spėti, kad antimedžiagai būdingos ir kitos neįprastos savybės. Šiandien sunku numatyti, ar sugebės kada nors žmonija panaudoti anihiliacijos energiją...

## Klausimai ir užduotys

1. **Kokias žinote elementariąsias daleles?**
2. **Kas yra anihiliacija?**
3. **Parašykite referatą tema „Visatos sandaros teorija“.**
4. **Parašykite referatą tema „Antimedžiaga ir antigalaktikos“.**
5. **Parašykite referatą tema „Neutrinų astronomija“.**

# ASTRONOMIJA

## 25 SKYRIUS. SAULĖS SISTEMOS KŪNAI

### 159. Astronomijos samprata

**Astronòmija yra mokslas, tiriantis Visatos kūnų ir jų sistemų sandarą, judėjimą, susidarymą, raidą, Visatos medžiagos fizikinę būseną ir cheminę sudėtį.**

Tai vienas iš seniausių mokslų, kurio pradmenų buvo jau prieš kelis tūkstantmečius Babilonijoje ir Egipte. Kol žmogus nežinojo gamtos dėsnių, kiekviename žingsnyje jautė savo bejėgiškumą ir priklausomybę nuo aplinkinio pasaulio. Jis aklai garbino gamtos jėgas ir dangaus šviesulius, sudievindamas žaibą, griaustinį, vėją, Saulę, Mėnulį. Taip atsirado tikėjimas antgamtinėmis jėgomis, jų garbinimas.

Saulės mitai atsispindi įvairiose religijose, taip pat ir krikščionybėje, pvz., Kristaus gimimo šventė – šv. Kalėdos – sutampa su tuo žiemos laiku, kai dienos pradeda ilgėti, o naktys – trumpėti. Tai viena seniausių švenčių mitologijoje, kitaip dar vadinama Saulės dievo gimimo švente. Šv.Velykos, arba Kristaus prisikėlimo šventė, sutampa su gamtos pabudimu po ilgos žiemos.

Mėnulio garbinimo pėdsakų yra išlikę musulmonų religijoje, kurioje pusmėnulis yra religinis simbolis.

Taigi religiniai prietarai, dangaus šviesulių garbinimas ir visuomeninių reiškinių (pvz., sukilimų karų, nepagydomų ligų) priežasčių nesuvokimas sudarė sąlygas atsirasti fantastinei sampratai, jog dangaus šviesuliai turi įtakos Žemėje vykstantiems įvykiams. Klaidingas mokymas apie dangaus šviesulių įtaką, apie galimybę išpranašauti įvykius Žemėje iš dangaus šviesulių padėties įgavo **astrològijos** (gr. *astrologia* – vaizdinių sistema, teigianti, kad žvaigždės ir planetos yra dievų valdomi ir lemia žmonių, tautų, valstybių likimą bei gamtos reiškinius) **vardą, o tokie pranašautojai buvo vadinami astrològais**.

Palankios sąlygos astrologijai atsirasti susidarė dėl to, kad nebuvo žinoma, kodėl planetos daro sudėtingas kilpas. Tikėdami „dangaus gyventojais“, kurie valdą visą pasaulį, žmonės sudievino šiuos šviesulius. Dėl to planetos buvo pavadintos vardais tų dievų, kurių įsikūnijimu jos buvo laikomos. Nežinodami, kad visus gamtos ir visuomeninius reiškinius nulemia dėsningos, žemiškos, gamtinės priežastys, nepriklausančios nuo jokių dvasių arba dievybių, žmonės tikėjo astrologais. Dėl to atsirado tikėjimas „laimingomis žvaigždėmis“ bei „nelaimingomis planetomis“, likimu, paplito *astromántija* (gr. *astromanteia* – būrimas iš žvaigždžių).

Žiloje senovėje, matydami kasdien patekant ir nusileidžiant Saulę bei regimąjį žvaigždžių judėjimą horizonto atžvilgiu, žmonės manė, kad visi dangaus šviesuliai sukasi aplink nejudančią Žemę. Todėl Žemė ir dangus ilgą laiką buvo priešinami vienas kitam.

Babilonijoje ir Egipte žyniai – religijos tarnai – mokslą naudojo savo tikslams. Bijodami prarasti autoritetą ir valdžią, jie visas žinias laikydavo didelėje paslaptyje. Norėdami nustatyti kalendorinius metus, susijusius su dangaus reiškiniais, žyniai turėjo tuos reiškinius tyrinėti. Jie buvo surinkę daug faktinių duomenų apie dangaus reiškinius, bet nemokėjo ir nesugebėjo jų teisingai išaiškinti. Užuot gvildenę dangaus kūnų prigimtį, žyniai toliau plėtojo astrologiją ir tokiu būdu laikė prietaringoje baimėje ne tik liaudį, bet ir jos valdovus.

Vėliau, plėtojant mokslą apie Visatos sandarą, žmonėms buvo akivaizdžiai ir įtikinamai parodyta, kad pasaulis yra ne toks, kokį jį vaizduoja šventosios knygos arba šventieji raštai.

Jau patys pirmieji dangaus tyrinėtojai pastebėjo, kad, orientuojantis pagal Saulės ir žvaigždžių padėtį, galima nustatyti laiką, pvz., vidurdienis yra tada, kai Saulė tą dieną pasiekia aukščiausią padėtį danguje. Pagal Mėnulio formos kitimą (jaunatis, priešpilnis, pilnatis, delčia) ir Saulės bei kitų šviesulių padėtį danguje imta matuoti ilgus laiko tarpus, t. y. sudarinėti kalendorius. Senovės klajokliams ir jūreiviams dangaus šviesuliai padėdavo sužinoti paros laiką ir surasti teisingą kryptį, pavyzdžiui, stepėje ar dykumoje. Keliautojai išmoko pagal žvaigždes nustatyti pasaulio šalis. Be to, jie žinojo, kuriam laikui praėjus pasikartoja vienodos Mėnulio fazės.

Pradėjus verstis žemdirbyste, astronomija tapo dar reikalingesnė. Žemdirbiams prireikė kalendoriaus, kad galėtų iš anksto reguliuoti žemės ūkio darbus pagal metų laikus.

Klaidžiojančius šviesulius, planetas ir jų regimąjį kilpų pavidalo judėjimą jau žinojo senovės egiptiečiai ir babiloniečiai.

Politinio ir kultūrinio gyvenimo centrui persikėlus iš Babilonijos ir Egipto į senovės Graikiją, surinktus astronominius duomenis perėmė graikų mąstytojai. Jie toliau plėtojo astronomijos mokslą, sėkmingai pritaikydami jai savo matematines žinias.

Seniausios astronomijos žinios atkeliavo iš egiptiečių, babiloniečių, finikiečių, kinų ir majų (3000 m. pr. Kr.). Apie 4000 m. pr. Kr. egiptiečiai sudarė Saulės kalendorių (lot. *Calendae*, *Kalendae* – senovės Romos kalendoriaus pirmosios mėnesio dienos pavadinimas), gana tiksliai nustatė metų trukmę. Babilonijoje jau 721 m. pr. Kr. aprašytas Mėnulio užtemimas. Iš Babilonijos net į mūsų laikus atklydo paros dalijimas į 24 valandas.

Visus senovės graikų mokslo laimėjimus IV a. pr. Kr. apibendrino vienas didžiausių senovės pasaulio mokslininkų Aristotelis (384–322 m. pr. Kr.). Anot jo, kiekviena planeta, Saulė ir Mėnulis esą pritvirtinti prie permatomų kietų dangaus sferų – kiekvienas šviesulys prie savo sferos. Tolimiausioje sferoje yra visos žvaigždės. Visos šios sferos, koncentriškai įdėtos viena į kitą, sukasi skirtingu greičiu apie jų centre esančią nejudančią Žemę. Be to, sferos iš dalies veikia viena kitą. Todėl, pasak Aristotelio, ir įvyksta visi regimieji dangaus šviesulių judėjimai.

**Visatos sistema, kurios centre yra Žemė, vadinama geocentrinè sistemà** (gr. *geos* – Žemė). Šio modelio buvo laikomasi net iki XVI a. vidurio.

I tūkstantmetyje pr. Kr., prie Viduržemio jūros susikūrus graikų valstybėms, plėtojusioms jūreivystę, astronomijos raida paspartėjo. VI a. pr. Kr. graikų filosofas ir matematikas Pitagoras (*Pythagoras*) patobulino Talio (*Thales*) pasaulėvaizdį apie plokščią Žemę, apgaubtą žvaigždėto dangaus. Anot Pitagoro, Žemė yra rutulys, laisvai skriejantis erdvėje; aplink Žemę skrieja Saulė, Mėnulis, žvaigždės ir planetos.

Didžiausias senovės graikų astronomijos laimėjimas buvo Visatos sistema, kurią II a. išdėstė Aleksandrijos mokslininkas Klaudijus Ptolemėjas (*Ptolemaios*; apie 90–168 m.). Jis taip pat rėmėsi geocentriniais vaizdiniais ir, aiškindamas planetų kilpų pavidalo judėjimą, teigė, kad kiekviena planeta tolygiai juda mažuoju apskritimu (kurį jis pavadino *epiciklù*), o šio apskritimo centras savo ruožtu juda didžiojo spindulio apskritimu (*deferentù*) aplink Žemę. Kadangi tie judėjimai vyksta įvairiose plokštumose, todėl stebėtojui, esančiam Žemėje, atrodo, kad planetos juda kilpomis čia į priekį, čia atgal (9 pav. (sp.)). Nors Ptolemėjas ir klaidingai aiškino planetų judėjimą, bet pagal jo teoriją buvo galima iš anksto apskaičiuoti planetų padėtį danguje, todėl ši teorija davė praktinės naudos.

Žlugus valstybėms, kuriose klestėjo graikų kultūra, Vakarų Europoje ėmė dominuoti valstybės, kuriose viduramžiais buvo labai primityvus, mažai suinteresuotas mokslu ūkis bei išplėtota jūrininkystė, o krikščionių bažnyčia draudė tyrinėti gamtą, laikydama tai nuodėmingu darbu. To laikotarpio Europoje samprata apie Visatą buvo dar naivesnė ir netikslesnė, negu egiptiečių ir graikų, pvz., Žemė buvo vaizduojama kaip plokščias skritulys arba net keturkampis, o žvaigždės laikomos aukso vinimis, įkaltomis į dangaus skliautą, arba žiburiais, kuriuos uždega angelai.

Didžiųjų geografinių atradimų epochoje, kai stiprėjantis prekybinis kapitalas vertė europiečius leistis į jūras ir vandenynus ieškoti naujų turtų, noromis nenoromis teko atkreipti dėmesį į astronomiją. Imta studijuoti senovės graikų mokslininkų kūrinius, kuriuos išsaugojo viduramžių arabai. Kadangi arabai buvo geri jūrininkai, tai vertino ir studijavo astronomiją. Iš tų laikų yra išlikę daug astronominių pavadinimų ir terminų.

Tų laikų bažnytinė valdžia fanatiškai persekiojo viską, kas tik buvo priešinga religijai, bet būdama suinteresuota pelnu iš prekybinių užjūrio kelionių, leido nagrinėti Ptolemėjo teoriją su kai kuriais apribojimais ir papildymais pagal religines dogmas.

Besiplečiant susisiekimui jūromis, reikėjo vis tikslesnių astronominių skaičiavimų, kurių Ptolemėjo teorija negalėjo duoti, nes ji buvo nepatogi, gremėzdiška, nepakankamai tiksli bei mažai tikėtina.

Nustatyti, kad Žemė – judanti planeta, ir parodyti jos tikrąją vietą Visatoje sugebėjo genialusis lenkų mokslininkas Mikalojus Kopernikas (*Kopernik*; 1473–1543). Šviesulių tekėjimą ir leidimąsi jis aiškino Žemės sukimusi paros bėgyje, o regimąjį Saulės judėjimą žvaigždžių atžvilgiu – metiniu Žemės sukimusi aplink Saulę, o ne aplink Žemę.

Iki Mikalojaus Koperniko laikų žvaigždėtame dangaus skliaute buvo skiriami septyni klajojantys šviesuliai. Romėnai juos siejo su dievais ir jų vardais pavadino savaitės dienas: Saulės vardu – sekmadienį, Merkurijaus vardu – trečiadienį, Veneros vardu – penktadienį ir Saturno vardu – šeštadienį. Daugumos Vakarų Europos tautų kalbomis savaitės dienos ir dabar tebevadinamos tų šviesulių vardais.

Anot Koperniko teorijos, Žemė tapo viena iš planetų ir užėmė trečią vietą skaičiuojant nuo Saulės. Tokiu būdu Kopernikas pirmasis įrodė, kad klajojančių šviesulių judėjimo centras yra ne Žemė, o Saulė. Planetas (nuo Saulės) jis išdėstė taip: Merkurijus, Venera, Žemė, Marsas, Jupiteris ir Saturnas. M. Koperniko **sistema su Saule centre vadinama heliocentrinè sistemà** (gr. *helios* – Saulė, *centrum* – vidurys). Teisingai išvadai, kad Saulė, o ne Žemė yra judančių šviesulių centras, padaryti įtakos turėjo ir tai, kad Saulė yra nepalyginamai didesnis kūnas negu Žemė. Gražiajai karštais ir šviesiais spinduliais spindinčiai Saulei labiau negu Žemei tiko pasaulio valdovės sostas (10 pav. (sp.)).

Ši teorija sugriovė seną astronomijos mokslo sampratą ir paskatino imtis gamtos tyrimo, nepaisant pasenusio bažnytinio mokymo, stabdžiusio ne tik astronomijos, bet ir kitų mokslų plėtrą. Nuo to laiko ir kiti mokslai pradėjo sparčiau plėtotis.

Sužinojęs, kad Olandijoje išrastas žiūronas, arba *teleskòpas*, 1609 m. italų mokslininkas Galilėjas Galilėjus (*Galilei*) pats pasigamino tokį prietaisą ir juo stebėjo dangaus šviesulius. Teleskopu Galilėjus padarė daug žymių atradimų ir, teisingai juos išaiškinęs, įrodė Koperniko teorijos teisingumą.

Visų pirma, Galilėjus atrado kalnus Mėnulyje. Tai patvirtino idėją, kad dangaus kūnai yra panašūs į Žemę ir kad pažiūros, jog tarp dangaus ir Žemės yra griežtas skirtumas, yra klaidingos.

Po to Galilėjus aptiko, kad apie Jupiterį skrieja keturi palydovai, panašiai kaip Mėnulis sukasi aplink Žemę. Taip buvo įrodyta, kad Žemė yra nevienintelis dangaus kūnų centras, ir pasidarė lengviau įtikinti žmones, jog planetos sukasi aplink Saulę, o ne aplink Žemę.

Galilėjus atrado ir Veneros fazes, t. y. nustatė, kad ji, kaip ir Mėnulis, keičiasi. Iš to buvo padaryta išvada, kad Venera yra rutulys, kuris šviečia atsispindėjusia nuo Saulės šviesa ir sukasi aplink Saulę, o ne aplink Žemę.

Pro savo teleskopą Galilėjus pastebėjo Saulėje tamsias dėmes, nors religija Saulę laikė dangiško skaistumo simboliu. Iš regimojo dėmių slinkimo Saulės disku Galilėjus padarė išvadą, kad Saulė sukasi apie savo ašį. O įsitikinus, kad dangaus kūnas sukasi apie savo ašį, lengviau buvo patikėti, kad sukasi ir Žemė.

Be to, Galilėjus pro teleskopą pastebėjo, kad Paukščių Takas – toji švytinti juosta žvaigždėtame danguje – yra daugybės silpnai šviečiančių žvaigždelių sankaupa. Taigi Visata – daug didesnė, negu buvo manoma. Po visų šių atradimų sunku buvo patikėti, kad milžiniška Visata galėtų per vieną parą apsisukti apie mažytę Žemę. Šiais atradimais ir daugeliu kitų argumentų Galilėjus patvirtino Koperniko atradimo teisingumą.

Plisti Koperniko idėjoms, prieštaravusioms šventiesiems raštams, tvirtinusiems, jog Žemė nejuda, daug padėjo kitas karštas Koperniko šalininkas – Galilėjaus tautietis ir amžininkas, rašytojas ir filosofas Džordanas Brunas (*Bruno;* 1548–1600).

Brunas nuėjo toliau už Koperniką, teigdamas, kad žvaigždės yra tolimos saulės, kad Visata neturi pabaigos, kad pasaulių – žvaigždžių ir planetų – yra begalinė daugybė ir kad kitose planetose, kituose pasauliuose taip pat turi egzistuoti gyvybė. Tai dar labiau prieštaravo šventiesiems raštams ir žlugdė bažnyčios autoritetą. Įpykę bažnytininkai atidavė Bruną inkvizicijos teismui, kuris buvo įsteigtas kovai su *erètikais*, t. y. kitų pažiūrų žmonėmis. Buvo pareikalauta, kad Brunas atsisakytų savo įsitikinimų. Tačiau mokslininkas nesutiko to padaryti, todėl buvo atiduotas budeliams ir 1600 m. Romoje gyvas sudegintas ant laužo.

Kita bažnytinės priespaudos auka tapo Galilėjus. 1616 m. jis buvo iškviestas pas vieną popiežiaus kardinolų ir įspėtas dėl Koperniko idėjų gynimo ir platinimo. Bet Galilėjus, būdamas ištikimas mokslui, ir toliau drąsiai gynė pažangias Koperniko pažiūras. 1633 m. Galilėjus buvo perduotas inkvizicijos teismui, kuriame bažnytininkai grasinimais privertė mokslininką atgailauti ir nuteisė jį kalėti iki gyvos galvos. Kiek vėliau ši bausmė buvo pakeista draudimu išvažiuoti iš savo namų.

Rusijoje prieš religinį teiginį, jog Žemė nejuda, drąsiai kovojo M. Lomonosovas (1711–1765), kuris rūpinosi Koperniko mokymo skleidimu ir sąmojingomis eilėmis išjuokė bažnytinius *obskurantùs* (mokslo ir pažangos priešus arba tamsuolius). Remdamasis Koperniko mokymu, Lomonosovas padarė išvadą, kad ne tik Žemėje, bet ir kitose planetose gali būti protingų būtybių ir siekė, kad bažnyčia netrukdytų mokslo žinių populiarinimui.

Šiais laikais, kai yra išmatuota ne tik Saulės bei planetų, bet ir daugybės žvaigždžių nuotolis, judėjimo greitis, dydis, fizikinės savybės, dėl pasaulio centro nebesiginčijama. Visiems aišku, kokios jėgos valdo Visatos kūnus, žinomos pagrindinės Saulės sistemos planetų ypatybės, jų masė. Saulės masė didesnė už visų jos šeimos narių masę kartu paėmus net pusaštunto šimto kartų. Milijardus metų Saulė skleidžia galybę energijos, kurios tik nedidelė dalis tenka Žemei ir kitoms planetoms. Tačiau Saulės spinduliavimas nulemia visos sistemos narių gyvenimą ir būtį.

Astronomija naudojamasi ir mūsų dienomis: tikslų laiką, skelbiamą per radiją, nustato astronomai, stebėdami dangaus šviesulių judėjimą; tiksliems geografiniams žemėlapiams sudaryti irgi reikalingos astronominės žinios. Astronomija ir kiti mokslai padėjo išsipildyti žmonijos svajonėms – į kosmosą buvo paleisti dirbtiniai Žemės palydovai bei kosminiai laivai su žmonėmis. Taigi astronomija, kaip ir seniau, glaudžiai susijusi su praktinių žmogaus poreikių tenkinimu. Šiuo metu ji padeda ieškant kitų klestinčių civilizacijų, kurios galbūt turės lemiamą reikšmę ir žemiškosios civilizacijos likimui.

Šis mokslas turi ne vien praktinę, bet ir pažintinę reikšmę: sužinojome savo „adresą“ Visatoje ir jos milijardų metų gyvavimo istoriją. Pagal regimąjį žvaigždžių judėjimą dangumi galima nustatyti geografines koordinates Žemės paviršiuje, matuoti laiką. Astronomai įspėja apie artėjančias magnetines audras, apskaičiuoja, kokiomis orbitomis skrieja dirbtiniai Žemės palydovai ir tarpplanetinės stotys. Be to, astronomijos atradimai skatina kitų mokslų, kaip antai: fizikos, chemijos, biologijos, medicinos, geologijos ir t. t., plėtrą.

Pagal tyrimo objektus, metodus ir uždavinius astronomija skirstoma į *astrofìziką, astromètriją, prãktinę astronòmiją, dangaũs mechãniką, planètų astronòmiją, žvaigždžių̃ astronòmiją, kosmogònijas* ir *kosmològiją*.

XIX a. antroje pusėje, atradus fotografiją ir spektrinę analizę, prasidėjo naujos mokslo šakos – astrofizikos – istorija.

**Astrofizika** (gr. *astron* – žvaigždė) – **tai mokslas apie dangaus kūnų ir kosminės erdvės medžiagos sandarą, cheminę sudėtį, fizikines savybes, spinduliavimą, juose vykstančius procesus, jų kilmę ir evoliuciją bei kosminės erdvės fizikinius laukus** (magnetinius, gravitacinius ir kt).

Astrofizikos tyrimo objektai – *planètos* (gr. *planetes* – klajoklė), Saulė, Žvaigždės ir tarpžvaigždinių planetų medžiaga. Daugiausia žinių apie jų sandarą, cheminę sudėtį, temperatūrą ir kt. gauname iš jų skleidžiamų spindulių. Žemės atmosferos sugeriamiems spinduliams tirti naudojami aukštai iškylantys balionai, raketos ir dirbtiniai Žemės palydovai.

Kosminius reiškinius, susijusius su greičiais, artimais šviesos greičiui, ir su kosminiais kūnais, kurių medžiagos tankis ypač didelis (neutroninių žvaigždžių, juodųjų skylių, baltųjų nykštukių), tiria **reliatyvìstinė astrofìzika**.

**Astromètrija** tiria šviesulių padėtis dangaus sferoje, tų padėčių kitimą, Žemės sukimąsi ir astronominį laiką.

Su astrometrija glaudžiai susijusi **prãktinė astronòmija**. Remiantis šios šakos duomenimis, nustatomos įvairių Žemės vietų geografinės koordinatės, tikslus laikas. Be to, šiais duomenimis naudojamasi aviacijoje, jūreivystėje, geodezijoje ir kosmonautikoje.

**Dangaũs mechãnika** gvildena gravitacijos veikiamų Visatos kūnų judėjimą. Pagal tai apskaičiuojamos jų orbitos ir sudaromos *efemerìdės*, t. y. lentelės, kuriose numatoma planetų, asteroidų, kometų, žvaigždžių ir kitų Visatos kūnų padėtis ateityje.

**Planètų astronòmija** tiria Saulės ir kitų žvaigždžių sistemoms priklausančių planetų ir jų palydovų, asteroidų, meteorinių kūnų, kometų sandarą, jų fizikines ir chemines savybes, atmosferą.

**Žvaigždžių̃ astronòmija** tiria žvaigždžių (tarp jų ir Saulės) bei jų sistemų (spiečių, galaktikų), dujų ir dulkių ūkų erdvinį pasiskirstymą, judėjimą, sandarą ir evoliuciją.

**Kosmogònija** aiškina Visatos kūnų ir jų sistemų kilmę ir raidą, remdamasi jų fizikine būsena, juose vykstančiais fizikiniais ir cheminiais reiškiniais, fizikos dėsniais ir matematiniais metodais.

**Kosmològija** – tai teorinė astronomijos šaka, tirianti Visatą kaip visumą, jos geometrinę struktūrą, medžiagos ir laukų struktūrą, Visatos susidarymą ir evoliuciją. Ji remiasi kitų astronomijos šakų ir elementariųjų dalelių bei fizikinių laukų fizikos tyrimų rezultatais.

Astronomija glaudžiai siejasi su **kosmonáutika**, t. y. kosminės erdvės tyrimu automatinėmis stotimis ir pilotuojamais erdvėlaiviais. Astronomai apskaičiuoja kosminių stočių, erdvėlaivių trajektorijas, koreguoja jų skrydžius, užtikrina tikslų judėjimą erdvėje.

## 160. Planetų judėjimas ir Keplerio dėsniai

Kopernikas nustatė planetų apsisukimo aplink Saulę periodus ir jų nuotolius nuo jos palyginus su Žemės atstumu nuo Saulės.

Žemės ir planetų tarpusavio padėtis visą laiką kinta, pvz., planeta, esanti toliau nuo Saulės negu Žemė, pastarosios atžvilgiu gali atsidurti už Saulės (11 pav. (sp.)), o esanti arčiau – tarp Žemės ir Saulės arba taip pat už Saulės (12 pav. (sp.)). Šitokiose padėtyse planetų nematome, nes jos pasislepia Saulės spinduliuose.

Planetai, esančiai toliau negu Žemė nuo Saulės, stebėti geriausias laikas yra tada, kai ji matyti Saulei priešingoje pusėje. Tuomet planeta būna arčiausiai Žemės ir geriausiai matoma pro teleskopą (ypač vidurnaktį). **Planetos padėtis, Žemės atžvilgiu priešinga Saulei, vadinama opozìcija.**

Planetos, esančios arčiau Saulės negu Žemė, kampas tarp krypties iš Žemės į planetą ir krypties į Saulę kinta. Merkurijaus jis nebūna didesnis negu 29°, o Veneros – negu 48°. Tokią planetą geriausia stebėti, kai kampinis atstumas tarp jos ir Saulės yra didžiausias. Tuomet ji vėliausiai nusileidžia po saulėlydžio arba anksčiausiai užteka prieš Saulės tekėjimą priklausomai nuo to, iš kurios Saulės pusės ji mums matyti. 13 spalvotame paveiksle parodyta, kad Merkurijaus ir Veneros vaizdas keičiasi panašiai kaip Mėnulio. Tai priklauso nuo to, kaip į mus atsisukęs Saulės apšviestų planetų pusrutulis.

Kopernikas padarė išvadą, kad Žemės ir planetų judėjimo centras yra Saulė, bet tikrosios jų orbitų formos jis negalėjo nustatyti. Kaip ir visi senovės filosofai bei mokslininkai, Kopernikas buvo įsitikinęs, kad danguje visi judėjimai yra tolyginiai, o jų trajektorijos – apskritimai. Todėl tikslų planetų judėjimą Koperniko teorija atspindėjo ne ką geriau už Ptolemėjaus teoriją.

Danų astronomas Tichas Brahė (*Brahe*; 1546–1601), laikytas kruopščiausiu stebėtoju iki teleskopo išradimo, buvo įsitikinęs, kad planetos juda aplink Saulę, o Saulė ir Mėnulis – aplink Žemę. Po Brahės mirties jo atlikti žvaigždžių padėčių ir planetų judėjimo matavimai perėjo jo asistento austrų mokslininko Johano Keplerio (*Kepler*; 1571–1630) žinion. Po kelerių metų darbo Kepleris nustatė, kad planetos juda aplink Saulę ne apskritimais, bet *èlipsėmis*, ir 1609 m. paskelbė tris pagrindinius planetų judėjimo dėsnius.

Pirmasis dėsnis skelbia, kad **planetos juda elipsėmis, kurių viename židinyje yra Saulė.**

**Elipse vadinama plokščia uždara kreivė, kurios kiekvieno taško atstumų nuo dviejų taškų, vadinamų židiniais, suma yra visada pastovi.** 14 spalvotame paveiksle $O$ yra elipsės centras, $DA$ – didžioji ašis, $K$ ir $S$ – elipsės židiniai, taigi $KM + SM = DA$ (lygu didžiajai elipsės ašiai). Nesikeičiant elipsės didžiosios ašies ilgiui, elipsės susiplojimas yra tuo didesnis, kuo didesnis atstumas tarp jos židinių. Elipsės ištęstumo laipsnį apibūdina jos **ekscentricìtetas. Ekscentricitetu *e* vadinamas santykis, kurį sudaro elipsės centro atstumas *OS* nuo vieno elipsės židinio su didžiojo pusašio *OA* ilgiu,** t. y.

$$e = OS : OA. \qquad (322)$$

Elipsinės planetų orbitos mažai skiriasi nuo apskritimų, o jų ekscentricitetai nedaug didesni už nulį.

Iš pirmojo Keplerio dėsnio išplaukia, kad atstumas nuo Saulės nėra pastovus – jis keičiasi. **Artimiausias Saulei orbitos taškas vadinamas periheliù, o tolimiausias – afeliù.**

Žemės orbita taip pat yra elipsinė. Perihelyje Žemė būna sausio pradžioje, o afelyje – liepos pradžioje. Nors žiema šiauriniame Žemės pusrutulyje būna tada, kai Žemė yra arčiausiai Saulės, tačiau Saulės spindulių kritimo į Žemės paviršių kampo ir dienos ilgumo skirtumas vasarą ir žiemą turi didesnę įtaką, negu tie nedideli Žemės atstumo nuo Saulės pakitimai.

Antrasis Keplerio (arba plotų) dėsnis teigia, kad **planetos spindulys – vektorius per vienodus laiko tarpus apibrėžia vienodus plotus**.

**Planetos spinduliu – vektoriumi vadinama tiesės atkarpa, kuri jungia planetą su Saule.** Planetos judėjimo greitis kinta taip, kad plotas, kurį apibrėžia spindulys – vektorius per vienodus laiko tarpus, yra tas pats, nesvarbu, kurioje orbitos dalyje būtų planeta. 14 spalvotame paveiksle plotai *CSD*, *ESF* ir *ASH* yra lygūs, jeigu lankus *CD*, *EF* ir *AH* planeta nubrėžė per vienodus laiko tarpus. Taigi arti perihelio planetos judėjimo linijinis greitis yra didžiausias, o arti afelio – mažiausias. Todėl antrąjį Keplerio dėsnį galima formuluoti ir taip: **planetos greičiausiai juda tada, kai būna arčiausiai Saulės**.

Trečiasis Keplerio dėsnis nusako tikslų sąryšį tarp planetos *siderìnio periòdo* (laiko, per kurį planeta vieną kartą apskrieja Saulę) ir jos nuotolio nuo Saulės. **Visoms planetoms santykis $\frac{T^2}{R^3}$ yra pastovus dydis.**

Jeigu vienos planetos apsisukimo periodą ir orbitos didįjį pusašį pažymėsime atitinkamai raidėmis $T_1$ ir $R_1$, o kitos planetos – $T_2$ ir $R_2$, tai trečiąjį Keplerio dėsnį galėsime išreikšti šitokia formule:

$$\frac{T_1^2}{R_1^3} = \frac{T_2^2}{R_2^3} = const. \qquad (323)$$

Žemės apsisukimo apie Saulę periodas lygus $T_ž$ = 365,256 paros.

Iš stebėjimų žinant planetų apsisukimo aplink Žemę periodus, pagal šio dėsnio formulę galima nustatyti planetų orbitų didžiuosius pusašius Žemės orbitos didžiojo pusašio atžvilgiu (pastarasis laikomas vienetu). Tarkime, kad planetos orbitos didysis pusašis yra lygus jos vidutiniam atstumui nuo Saulės, nes orbitos didįjį pusašį gausime, sudėję planetos atstumus nuo Saulės perihelyje ir afelyje ir tą sumą padaliję pusiau. Iš 14 (sp.) paveikslo matyti, kad $\frac{DS + AS}{2} = OD$; čia *OD* – didysis pusašis.

Kadangi pagal trečiąjį Keplerio dėsnį visus planetų atstumus nuo Saulės galima nustatyti žinant Žemės atstumą nuo Saulės, tai Žemės orbitos didysis pusašis astronomijoje laikomas atstumo vienetu ir vadinama **astronominiu ilgio vienetu AU** (angl. *astronomical unit*).

Astronominis vienetas lygus vidutiniam atstumui tarp Žemės ir Saulės: 1 AU = = 149 597 870 km ≈ 150 · $10^9$ m.

Remiantis Keplerio dėsniais, planetų atstumai nuo Saulės astronominiais vienetais buvo nustatyti anksčiau, negu sužinotas AU ilgis kilometrais.

Matuojant šiais vienetais, Jupiteris nuo Saulės yra nutolęs apie 5 AU, o Plutonas – apie 40 AU. AU yra labai dažnai astronomų vartojamas vienetas, kadangi juo pagrįstas atstumų matavimas paralakso metodu, kurio čia neaptarinėsime.

Kitas vienetas – **parsèkas** (žymima ps) yra daug didesnis už AU. Jo pavadinimas yra žodžių „paralakso sekundė" santrumpa. **Vienas parsekas – tai atstumas, iš kurio Žemės orbitos didysis pusašis matomas 1″ (kampinės sekundės) kampu.** Jis lygus: 1 ps = $2{,}06 \cdot 10^5$ AU = $3{,}1 \cdot 10^{16}$ m.

Dar vienas astronominis vienetas, plačiai naudojamas dangaus kūnų atstumams apibūdinti – **šviesmetis (ly)** (angl. *ly – light year*) – **tai atstumas, kurį per vienerius metus nuskrieja šviesos spindulys.** 1 ly $\approx 9{,}5 \cdot 10^{15}$ m arba 1 ps $\approx$ 3,3 ly.

## Klausimai ir užduotys

**1. Ką nagrinėja astronomijos mokslas?**

**2. Kaip skirstoma astronomija pagal tyrimo objektus ir metodus? Nurodykite kiekvienos šių šakų esmę.**

**3. Kokia geocentrinės Visatos esmė? Kas pasiūlė tokį Visatos modelį?**

**4. Apibūdinkite M. Koperniko ir Galilėjaus mokslinių darbų svarbą astronomijos mokslui.**

**5. Kokia astronomijos, kaip vieno iš gamtos mokslų, reikšmė?**

**6. Išvardykite Keplerio dėsnius ir nurodykite praktinę šių dėsnių reikšmę.**

**7. Marsas yra pusantro karto toliau nuo Saulės negu Žemė. Kiek trunka metai Marse?**

**8. Plutonas apsisuka apie Saulę per 250 metų. Kokio dydžio yra jo orbitos didysis pusašis?**

## 161. Saulės sistemos evoliucija

Pirmą kartą moksliškai paaiškinti Saulės sistemos atsiradimą 1796 m. pabandė prancūzų matematikas Pjeras Laplasas (1749–1827). Iki tol kiek prasčiau argumentuotas Saulės sistemos kilmės hipotezes buvo iškėlęs anglas Tomas Raitas (*Wright*; 1711–1786) ir vokietis Imanuelis Kantas (1724–1804). Anot Laplaso, kuris išplėtojo **ū̃ko hipotèzę** (jos idėją 1644 m. pasiūlė Renė Dekartas (*Descartes*)), planetos susidarė iš besisukančio dujų debesies, susitraukusio dėl gravitacijos jėgų. Traukdamasis debesis suskilo į atskirus žiedus, iš kurių susidarė po vieną planetą. Pagal šią teoriją išorinės planetos būtų seniausios, vidinės – jauniausios; Saulė yra pirminio dujų debesies likutis.

Ūko hipotezė gyvavo daug metų, kol pagaliau, pristigus matematinių įrodymų, jos buvo atsisakyta.

Kiek vėliau sukurtos **pótvynių teòrijos**, tarp jų amerikiečio Tomo Čemberlino (*Chamberlin*; 1843–1928) ir Foresto Multono (*Multon*; 1872–1952) darbai, atnaujinę Žoržo de Biufono (*de Buffon*) 1745 m. iškeltą ir anglo Džeimso Džynso (*Jeans*; 1877–1946) išplėtotą hipotezę. Jie teigė, kad planetos susidarė praskriejus arti Saulės kitai žvaigždei, kuri išplėšė iš Saulės didžiulę medžiagos čiurkšlę. Žvaigždei

nuskriejus tolyn, išplėštoji medžiaga pradėjo suktis aplink Saulę. Ilgainiui ji pasidalijo į atskirus gumulus, iš kurių susidarė planetos. Šią hipotezę remia stebimas planetų išsidėstymas: didžiosios planetos (Jupiteris, Saturnas) skrieja viduryje, kur kaip tik ir turėjo būti storiausia nuplėštos čiurkšlės dalis. Potvynių teorijos, kaip ir ūko hipotezės, matematiškai pagrįsti nepavyko, todėl dauguma dabartinių astronomų jų visai nepripažįsta. Fredas Hoilis (*Hoyle*), gimęs 1915 m., pasiūlė dar vieną Saulės sistemos atsiradimo variantą. Anot jo, Saulė kadaise skriejo poroje su kita žvaigžde, kuri sprogo kaip supernova. Planetos susidarė iš sprogimo metu išsvaidytos medžiagos. Tačiau ši hipotezė irgi neturi šalininkų.

Šiuolaikinis mokslas teigia, kad Saulė ir planetos susidarė iš besitraukiančio ūko: veikiant gravitacijai, ūko medžiaga telkėsi į gumulus, iš kurių rutuliojosi planetos. Šio proceso detalės dar aptarinėjamos, bet pati teorija pakankamai tvirta. Vadinasi, Saulė ir planetos susidarė kartu ir iš tos pačios medžiagos.

Saulė yra nuolat spinduliuojanti pagrindinės sekos žvaigždė, tačiau ji tokia amžinai nebus. Tolimoje ateityje (maždaug po penkių milijardų metų), kai Saulėje pasibaigs branduolinis kuras – vandenilis, jos struktūra neišvengiamai keisis. Saulė pradės plėstis ir virs raudonąja milžine. Ateis laikas, kai ji spinduliuos 100 kartų daugiau energijos negu dabar.

Toks Saulės padidėjimas sukels vidinių planetų katastrofą. Jei jos ir nesudegs, tai neteks atmosferų, jose taps neįprastai karšta. Po to Saulė susitrauks į mažą, neišvaizdžią baltąją nykštukę, aplink kurią skries išlikusios planetos. Kiek tai tęsis, dar nežinia, bet viena jau dabar aišku: gyvybė Žemėje negali egzistuoti amžinai, kaip negali būti amžina ir dabartinė Saulės sistema.

## 162. Saulės sistemos planetos

Saulės sistemą sudaro viena žvaigždė Saulė, devynios didžiosios planetos ir įvairūs kiti mažesni kūnai, pvz., kai kurių planetų palydovai. Visus šiuos kūnus valdo Saulė, kuri yra daug kartų už juos didesnė ir tik ji viena spinduliuoja. Kiti Saulės sistemos kūnai šviečia tik atspindėta Saulės šviesa, ir, nors danguje atrodo ryškūs, sunku patikėti, kad Visatoje jie toli gražu nėra tokie svarbūs, kaip atrodo iš pirmo žvilgsnio.

*Pagal atstumą nuo Saulės, planetos su savo palydovais išsidėsčiusios tokia tvarka: Merkùrijus, Venerà, Žẽmė, Mársas, Jupìteris, Satùrnas, Urãnas, Neptū̃nas ir Plutònas* (žr. 17 lentelę; 15 pav. (sp.)).

Planetos skirstomos į dvi pagrindines grupes. Pirmąją grupę sudaro palyginti mažos planetos – Merkurijus, Venera, Žemė ir Marsas, kurių skersmenys yra nuo 12 756 km (Žemės) iki 4878 km (Merkurijaus).

Šių planetų orbitos beveik nesiskiria nuo apskritimų, tik Merkurijaus ir Marso keliai aplink Saulę ištęsti labiau negu Žemės ir Veneros. Merkurijus ir Venera vadinamos vidinėmis planetomis, nes jų orbitos yra Žemės orbitos viduje. Jos, kaip Mėnulis, keičia fazes nuo jaunaties iki pilnaties ir danguje visada matomos netoli Saulės. Merkurijus ir Venera neturi palydovų. Žemė turi vieną palydovą, gerai mums žinomą Mėnulį. Apie Marsą skrieja du palydovai – Fobas ir Deimas, kurie yra labai maži ir kitokios kilmės negu Mėnulis.

17 lentelė

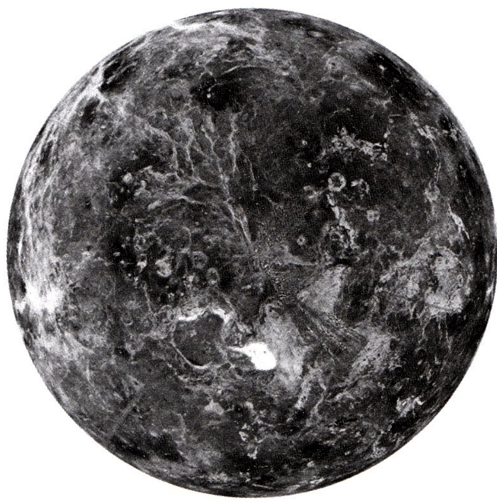
**Planetų duomenys**

| Planeta | Vidutinis atstumas nuo Saulės ($10^9$ m) | Vidutinis atstumas nuo Saulės (AU vienetais; Žemės – lygus 1) | Orbitinis periodas (Žemės metais) | Apsisukimo apie savo ašį periodas (valandomis) | Pusiaujo polinkis į orbitos plokštumą (laipsniais) | Vidutinė paviršiaus temperatūra (Celsijaus laipsniais) | Tankis (kg/$m^3$) | Masė (Žemės masės vienetais; Žemės – lygi 1) | Gravitacinis laukas paviršiuje (N/kg) | Palydovų skaičius | Didžiausias palydovas | Didžiausiojo palydovo masė (kg) | Vidutinis palydovo tankis (kg/$m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Merkurijus | 58 | 0,4 | 0,24 | 1416 | 0 | 350 | 5400 | 0,056 | 3,7 | 0 | | | |
| Venera | 108 | 0,7 | 0,61 | 5832 | 117 | 460 | 5300 | 0,815 | 8,9 | 0 | | | |
| Žemė | 150 | 1,0 | 1 | 24 | 23 | 15 | 5500 | 19,8 | 9,8 | 1 | Mėnulis | $7{,}2 \cdot 10^{22}$ | 3340 |
| Marsas | 228 | 1,5 | 2 | 25 | 25 | –20 | 4000 | 0,11 | 3,8 | 2 | Fobas | $9{,}6 \cdot 10^{15}$ | 2200 |
| Jupiteris | 778 | 5,2 | 12 | 10 | 3 | –73 | 1300 | 317,9 | 24,9 | 16 | Ganimedas | $1{,}5 \cdot 10^{23}$ | 2000 |
| Saturnas | 1427 | 9,5 | 29 | 10 | 27 | –120 | 700 | 95,1 | 10,5 | 17 | Titanas | $1{,}3 \cdot 10^{23}$ | 1800 |
| Uranas | 2870 | 19,1 | 84 | 11 | 98 | –213 | 1600 | 14,56 | 8,8 | 15 | Oberonas | $6{,}0 \cdot 10^{21}$ | 1600 |
| Neptūnas | 4497 | 30,0 | 165 | 16 | 30 | –213 | 2300 | 17,24 | 11,2 | 8 | Tritonas | $2{,}2 \cdot 10^{22}$ | 2000 |
| Plutonas | 2900 | 39,3 | 248 | 154 | 98 | –220 | 2000 | 0,0018 | 0,6 | 1 | Charonas | $2{,}2 \cdot 10^{21}$ | 2400 |

Žemės parametrai: masė = $5{,}97 \cdot 10^{24}$ kg; spindulys = $6{,}38 \cdot 10^{6}$ m.



353 pav.



354 pav.

**Merkùrijus**, arčiausiai prie Saulės esanti planeta, juda orbita labai greitai – jos metai tetrunka 88 Žemės paras. Merkurijų veikia labai stiprus Saulės gravitacinis laukas, sukeliantis dideles potvynių jėgas. Planetos para (apsisukimo apie savo ašį periodas) prilygsta maždaug dviem trečdaliams jos metų. Merkurijaus paviršius panašus į Mėnulio paviršių (353 pav. ir 16 pav. (sp.)). Jame matyti daug kraterių, o temperatūra kinta nuo +430 °C dieną iki – 160 °C naktį. Jo atmosfera labai reta, sudaryta daugiausia iš vandenilio, o magnetinis laukas maždaug 300 kartų silpnesnis už Žemės.

**Venerà** yra beveik tokio pat dydžio, kaip ir Žemė. Ji būtų dar labiau panaši į Žemę, jei ne jos atmosfera, kuri sudaryta beveik vien iš anglies dioksido (96%), azoto (≈ 3,5%) ir trupučio kitų elementų bei junginių. Vandens garų yra vos 0,1%. Veneros paviršiaus niekada nematyti, nes 50–70 km aukštyje jį dengia trys debesų sluoksniai (354 pav. ir 17 pav. (sp.)). Debesis sudaro sieros rūgšties lašeliai. Prie paviršiaus Veneros atmosferos slėgis yra beveik 95 kartus didesnis už Žemės atmosferos slėgį, o temperatūra siekia vidutiniškai 730 K (≈ 460 °C). Dienos ir nakties temperatūrų skirtumas yra vos 50 °C. Tai lemia vadinamasis šiltnamio reiškinys, kurį sukelia tanki Veneros atmosfera ir didelis anglies dioksido kiekis. Tokia atmosfera praleidžia regimuosius Saulės spindulius. Planetos paviršius, juos sugėręs, įšyla ir ima spinduliuoti infraraudonuosius spindulius, kuriuos sulaiko Veneros atmosferoje esantis anglies dioksidas.

Veneros paviršiuje yra kalnynų, plokščiakalnių, žemumų, kraterių, ugnikalnių (18 pav. (sp.)). Magnetinio lauko joje neaptikta. Sieros rūgšties debesys, susidarę iš koncentruotosios sieros rūgšties, visiškai slepia Veneros paviršių, tačiau jis yra neblogai ištyrinėtas radiolokatoriais ir įvairiais nuleistais aparatais, kurie, nors ir negali ilgai veikti tokiomis sąlygomis, suspėjo atsiųsti šiek tiek informacijos.

Nuo seno lietuviai šią planetą laikė Saulės dukra ir vadino ją Vakarine arba Aušrine.

**Žẽmė** yra didžiausia ir masyviausia tarp vidinių planetų. Ji yra trečioji pagal nuotolį nuo Saulės planeta (355 pav. ir 19 pav. (sp.)). Panašiausia į Žemę yra Venera – jų masės santykis 1 : 0,82. Marsas yra daug mažesnis nei Žemė, o Merkurijų geriau lyginti su Mėnuliu negu su Žeme.



355 pav.

Lyginant Žemę ir gretimas jai planetas, randama ne tik bendrų bruožų, bet ir žymių skirtumų. Pirmiausia, Žemė iš kitų planetų išsiskiria savo atmosfera, kurioje gausu deguonies, ir temperatūra, tinkama mums žinomai gyvybės formai. Jeigu Žemė būtų šiek tiek arčiau arba šiek tiek toliau nuo Saulės, gyvybė joje nebūtų galėjusi plėtotis.

Žemės *ekosferà*, arba erdvės dalis, kurioje Saulės spinduliavimas sudaro sąlygas, tinkamas gyvybei, prasideda beveik ties Veneros orbita ir tęsiasi iki Marso orbitos. Iki 1960 m. manyta, kad žemiška gyvybė gali egzistuoti visoje šioje erdvės dalyje. Ši galimybė menka Marse, kurio masė gerokai mažesnė negu Žemės, o atmosfera reta. Daugiausia buvo tikėtasi iš Veneros. Būdama beveik tokio pat tankio, dydžio ir masės kaip Žemė, Venera gauna beveik tiek pat Saulės energijos, nes daug jos atsispindi atgal į erdvę nuo Veneros debesų. Tik 1967 m. paaiškėjo, kad Veneros paviršiuje tvyro 485 °C karštis, ir teko pripažinti, jog sudėtinga žemiška gyvybė gali plėtotis gana siauroje erdvės dalyje.

Kita gyvybei būtina sąlyga yra atmosfera, reikalinga ne tik kvėpuoti, bet ir apsisaugoti nuo pražūtingos trumpabangės spinduliuotės, sklindančios iš kosmoso. Žemės paviršiuje tokio pavojaus nėra, nes šią spinduliuotę sugeria išoriniai atmosferos sluoksniai. Tuo tarpu Mėnulio arba Merkurijaus nuo šios spinduliuotės niekas neapsaugo. Jei Žemė būtų masyvesnė, ji tikriausiai būtų išlaikiusi bent dalį pirminio vandenilio, o jos atmosfera galbūt netiktų gyvybei. Antra vertus, jei planetos masė būtų mažesnė, į gaubiančią erdvę pasklistų ne tik vandenilis, bet ir kitos dujos. Toks nepaaiškinamas, laimingas aplinkybių sutapimas sudarė sąlygas žemiškajai gyvybei atsirasti ir plėtotis mūsų planetoje.

Be to, dar vienas labai svarbus veiksnys, lemiantis gyvybės egzistavimą – tai temperatūra, kuri priklauso ne tik nuo planetos nuotolio iki Saulės bei jos atmosferos sudėties, bet ir nuo planetos sukimosi apie ašį periodo. Žemės apsisukimo apie ašį periodas – 24 h, arba viena para, Marso – 37 minutėmis ilgesnis (vadinasi, jo para trunka 24 h 37 min). Merkurijuje ir Veneroje situacija visai kitokia. Jų apsisukimo periodai atitinkamai 58,6 ir 243 paros. Apskaičiuota, kad jei Žemė suktųsi lėčiau, klimato sąlygos skirtųsi nuo dabartinių ir būtų nepalankios gyvybei.

Žemės magnetinį lauką sukuria masyvus, daug geležies turintis jos branduolys, todėl ir šiuo požiūriu ją galima lyginti su kitomis planetomis. Ir vėl daug neaiškumų

kelia Venera, kadangi pagal dydį ir masę ji privalėtų turėti panašų į Žemės branduolį ir stiprų magnetinį lauką. Tačiau kosminiai aparatai neaptiko Veneroje jokių magnetizmo reiškinių, todėl aišku viena – jei ši planeta ir turi magnetinį lauką, tai jis yra be galo silpnas. Šiuo požiūriu nedaug kuo nuo Veneros skiriasi ir Marsas, užtat Merkurijus turi pakankamai gerai juntamą magnetinį lauką ir netgi magnetosferą. Tam įtakos, matyt, turi didelis Merkurijaus (kaip ir Žemės) vidutinis tankis – 5,5 g/cm$^3$, t. y. 5,5 karto didesnis negu vandens.

Žemė iš kitų planetų skiriasi dar ir tuo, kad didžiąją jos dalį dengia vanduo (71%). 97% paviršinių Žemės vandenų susitelkę Pasauliniame vandenyne. Jei jo vandenis paskleistume lygiai visame Žemės paviršiuje, gautume apie 2 km storio hidrosferos (gr. *hydro* – vanduo; Žemės vandenų visuma) sluoksnį. Apie 24 mln. km$^3$ vandens yra sušalę į ledą ir sniegą. Jei jis visas ištirptų, vandenynų ir jūrų lygis pakiltų apie 60 m, ir sausumos plotas gerokai sumažėtų.

Nors Žemė ir didžiausia iš keturių vidinių planetų, jos sausumos plotas yra daug mažesnis negu Veneros paviršius ir prilygsta Marso paviršiaus plotui. Vandenynų ir ežerų Marse negali būti, kadangi jo atmosferos slėgis yra mažas. Mėnulyje ir Merkurijuje apie vandens paieškas beprasmiška kalbėti, nes jie išvis neturi atmosferos. Veneros paviršiuje yra per daug karšta, kad galėtų būti skysto vandens. Taigi senas, nuo akmens amžiaus laikų išlikęs, Veneros vaizdas su vešlia augalija drėgnoje pelkėtoje aplinkoje pasirodė neteisingas ir netgi klaidingas.

Kadangi Žemė tokia savita, kartais buvo manoma, kad ji susidarė kitaip negu kitos planetos. Iš tikrųjų taip nėra. Žemės amžius, nustatytas radioaktyviuoju metodu, lygus maždaug 4,6 milijardo metų. Mėnulio uolienų tyrimai rodo, kad jo amžius lygiai toks pat. Nėra pagrindo abejoti, kad Žemė ir visi kiti Saulės sistemos kūnai susidarė iš prosaulinio ūko to paties proceso metu ir maždaug vienu laiku. Dažnai sakoma, kad Marsas yra labiau evoliucionavęs negu Žemė, ir tai, ko gero, tiesa. Tačiau absoliutusis jų amžius beveik vienodas. Taigi Marsas tiesiog greičiau paseno.

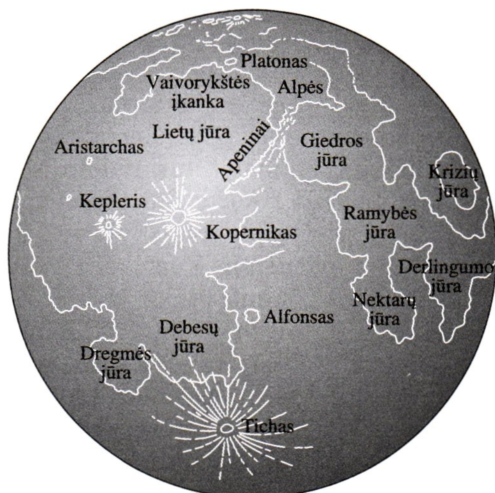
Žemės padėtis ekosferos viduryje, ypač jos dydis ir masė, turėjo didžiulę reikšmę unikaliai jos atmosferai. Žemė yra vienintelė apgyvendinta planeta, turinti atmosferą ir pakankamai vandens savo paviršiuje. Saulės sistemoje nėra kitos planetos, kurioje žmogus galėtų gyventi be dirbtinės aplinkos.

Mėnulis – vienintelis gamtinis Žemės palydovas, artimiausias jai kosminis kūnas. Vidutinis jo nuotolis nuo Žemės lygus 384 400 km, judėjimo greitis – 1,023 km/s, apskriejimo aplink Žemę periodas – žvaigždinis mėnuo – yra vidutinės saulinės paros. Kadangi jis tiksliai lygus apsisukimo apie ašį periodui, tai Mėnulis yra pasisukęs į Žemę visada ta pačia puse. Sinodinis mėnulio periodas yra 29,5 vidutinės saulinės paros – tiek laiko jame trunka para. Mėnulio trauka sukelia periodiškus Žemės vandenynų potvynius ir atoslūgius. Potvyniai kyla į Mėnulį atgręžtoje ir priešingoje Žemės pusėje, atoslūgiai – Žemės paviršiuje, kuris sudaro 90° kampą su Mėnulio kryptimi.

Mėnulio skersmuo yra 3476 km, o tai sudaro 1/4 Žemės skersmens. Jo masė lygi $\frac{1}{81,3}$ Žemės masės, o vidutinis tankis – 3,3 g/cm$^3$ (1,7 karto mažesnis negu vidutinis Žemės tankis). Vadinasi, Mėnulio viduje yra daug mažiau metalų. Jo paviršiuje gravitacija yra 6 kartus mažesnė negu Žemėje, todėl visi kūnai, tarp jų ir astronautai, Mėnulyje yra tiek pat kartų lengvesni.



356 pav.




357 pav.

Vienintelis Žemės palydovas neturi atmosferos, nes nedidelė jo trauka negali ilgai išlaikyti dujų apvalkalo, todėl antrasis kosminis greitis Mėnulio paviršiuje yra tik 2,4 km/s.

Mėnulio paviršius tamsus – atspindi tik 7% krintančios į jį Saulės šviesos. Dėl šios priežasties ir dėl to, kad nėra atmosferos, per pusę mėnesio trunkančią dieną Mėnulio paviršius ties pusiauju įkaista iki 400 K (apie +130 °C), o per naktį atvėsta iki 100–110 K (apie – 160–170 °C).

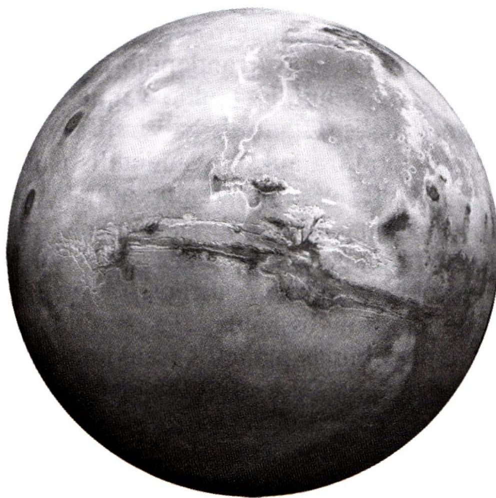
Plika akimi Mėnulyje matomos tamsios dėmės. Tai – lygios žemesnės sritys, vadinamos *jūromis* (356 pav., 357 pav. ir 20 pav. (sp.)). Matomoje pusėje didžiausi yra Lietų, Giedros, Ramybės, Derlingumo, Krizių jūros ir Audrų vandenynas, esantis rytinėje Mėnulio disko dalyje. Šviesios sritys yra kalnynai, vadinami *žemynais*. Šie pavadinimai sąlygiški, nes Mėnulio paviršiuje nėra vandens. Žiūrint pro mažiausią teleskopą ar žiūroną, Mėnulio paviršiuje, ypač – kalnuotose srityse, matosi daugybė kraterių. Jūrose pasitaiko pavienių didelių kraterių. Jūrų pakraščiais driekiasi kalnų grandinės, kai kurių aukštis siekia net iki 6 km.

Mėnulio kraterių dydis labai įvairus – nuo kelių metrų iki 200 km pločio. Jie apskriti, plokščiais dugnais, o kraterių kraštus riboja kelių kilometrų aukščio briaunos. Mėnulio kraterius išrausė į jo paviršių krisdami dideli meteoritai. Taip susidarė ir kai kurios apvalios jūros, pvz., Rytų ir Lietų. Kraterio arba jūros dugną užpildė iš Mėnulio gelmių išsiveržusi lava. Iš Žemės nematomoje Mėnulio pusėje jūrų daug mažiau – ten daugiau krateriais nusėtų kalnynų.

Mėnulio krateriams suteikti mokslininkų vardai. Trys iš jų pavadinti Vilniaus observatorijos direktorių – Počobuto, Sniadeckio ir Dzievulskio – vardais.

Mėnulis – geriausiai ištirtas dangaus kūnas (21 ir 22 pav. (sp.)). 1959–1976 m. jį tyrė automatinės stotys, 1968–1972 m. – „Apolono“ erdvėlaiviai. Be to, Mėnulyje buvo nusileidę 12 astronautų (23 pav. (sp.)). Į Žemę atgabenta apie 400 kg jo paviršiaus uolienų.

**Mársas** yra daug mažesnis už Žemę, todėl ir jo gravitacinis laukas gerokai silpnesnis už mūsų planetos gravitacinį lauką. Dėl šios priežasties jis negalėjo išlaikyti pakankamai tankios atmosferos. Svarbiausia medžiaga – anglies dvideginis (95%), slėgis prie paviršiaus nesiekia nė 10 milibarų (1000 Pa). Todėl jo paviršiuje stebimi ne tik krateriai, bet ir vadinamieji kanalai, kuriais, manoma, kadaise tekėjo vanduo (358 pav. ir 24, 25, 26 pav. (sp.)). Nedidelis vandens kiekis Marse aptinkamas ir dabar. Jis sudaro poliarines ledo (su tam tikra sušalusio anglies dvideginio – sauso ledo – priemaiša) kepures. Ašigalių kepurių dydis kinta priklausomai nuo metų laikų; kai kepurės didžiausios, jas galima pamatyti pro nedidelį teleskopą.



358 pav.

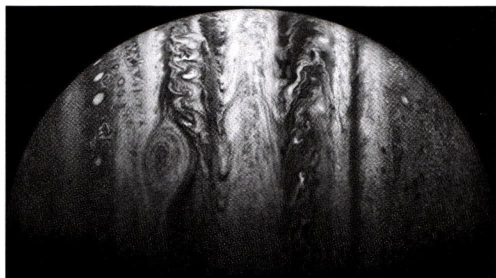
Gali būti, kad daugiau vandens yra Marso viduje. Ši planeta panaši į Žemę dar ir tuo, kad turi kietą paviršių. Marse pučia stiprūs vėjai, sukeliantys smėlio audras. Temperatūra ties pusiaują kinta nuo 20 °C dieną iki –100 °C naktį. Neatmetama teorija, kad Marse kada nors galėjo būti tinkamos sąlygos gyvybei atsirasti.

1877 m. Asafas Holis (1829–1907) pro Vašingtono observatorijos (JAV) 66 cm skersmens refraktorių atrado du Marso palydovus, vėliau pavadintus Fobu (27 pav. (sp.)) ir Deimu. Palyginti su Mėnuliu, abu jie itin maži ir spindi labai blyškiai. Palydovai nėra rutulio formos: didžiausias Fobo matmuo 28 km, o Deimo – 16 km. Abiejų paviršiuje matosi daugybė smūginių kraterių.

**Jupìteris** yra penktoji pagal nuotolį nuo Saulės planeta, apskriejanti ją per 11,86 Žemės metų. Tai didžiausia Saulės sistemos planeta (jos skersmuo 11 kartų didesnis už Žemės skersmenį), būdingiausia antrajai, Jupiterio tipo planetų, grupei, kurios, priešingai žemiškosioms, sudarytos iš dujų (359 pav. ir 28 pav. (sp.)). Jį patogu stebėti kelis mėnesius per metus, nes labiau už jį spindi tik Venera ir retkarčiais – Marsas.

Į milžinišką Jupiterio dydžio gaublį tilptų 1300 Žemės dydžio planetų, bet jo masė dėl palyginti mažo vidutinio tankio tik 318 kartų didesnė negu Žemės. Trumpas Jupiterio apsisukimo apie savo ašį periodas (mažiau negu 10 h) reiškia, kad jo sritys ties pusiauju yra iškilusios. Pro teleskopą matoma, kad planeta labai suplota ties ašigaliais. Jupiterio skersmuo ties pusiauju lygus beveik 143 000 km, o ties ašigaliu nesiekia 135 000 km.

Vidinė Jupiterio sandara modeliuojama teoriškai. Daugelį metų buvo manoma, kad Jupiteris turi kietą bran-



359 pav.

duolį, kurį gaubia storas ledo sluoksnis, o pastarąjį – atmosfera. Dabar šios hipotezės atsisakyta. Spektroskopiniai tyrimai rodo, kad Jupiterio atmosferos išoriniuose sluoksniuose gausu vandenilio ir jo junginių – amoniako ir metano. Manoma, kad dėl mažo vidutinio tankio vandenilis yra pagrindinė Jupiterio atmosferos sudedamoji dalis. Giliau jis gali būti skystas, o arti branduolio, kur slėgis labai didelis ir temperatūra aukšta, vandenilis gali būti metalo būsenos.

Jupiterio centre temperatūra gali siekti 25 000 °C, t. y. daug daugiau negu Žemės gelmėse; jo debesų temperatūra – 138 °C. Nepaisant to, Jupiteris, be abejonės, yra planeta, o ne maža žvaigždė. Jos gelmių temperatūra per žema, kad vyktų termobranduolinės reakcijos. Tačiau Jupiteris išspinduliuoja daugiau energijos, negu pats jos gauna iš Saulės. Tą papildomą energiją sukelia pastovus, tačiau labai lėtas ir nepastebimas planetos traukimasis. Jupiteris taip pat turi magnetinį lauką, kuris yra maždaug 20 kartų stipresnis už Žemės magnetinį lauką, ir yra radijo bangų šaltinis. Astronomai kol kas negali išsamiai paaiškinti jų kilmės.

Atmosferos išorėje nuolat matyti Raudonoji Dėmė – apie 40 000 km ilgio sūkurio židinys. Gali būti, kad Jupiterio centre iš silikatų yra susidariusi šerdis (apie 20 kartų didesnės nei Žemė masės), apsupta metalinio, o toliau – skystojo vandenilio.

Aplink šią planetą skrieja 16 palydovų, iš kurių keturi didieji matomi pro žiūronus (29 pav. (sp.)). Be to, Jupiteris turi siaurą iš Žemės nematomą žiedą, sudarytą iš ledo gabalėlių ir dulkių.

**Satùrnas** – senovėje laikyta tolimiausia planeta, puikiai matoma plika akimi. Iki teleskopo išradimo nebuvo matomi jo žiedai, kurie yra vienas gražiausių objektų visame danguje (360 pav. ir 30 pav. (sp.)).

Vidutinis Saturno nuotolis nuo Saulės lygus 1427 mln. km, apskriejimo apie ją periodas – 29,46 metų. Jo opozicijos kartojasi kas 378 paros, taigi Saturną galima stebėti kelis mėnesius kasmet. Tai antroji pagal dydį Saulės sistemos planeta. Saturno skersmuo yra 10 kartų didesnis už Žemės skersmenį, o masė – 95 kartus



360 pav.

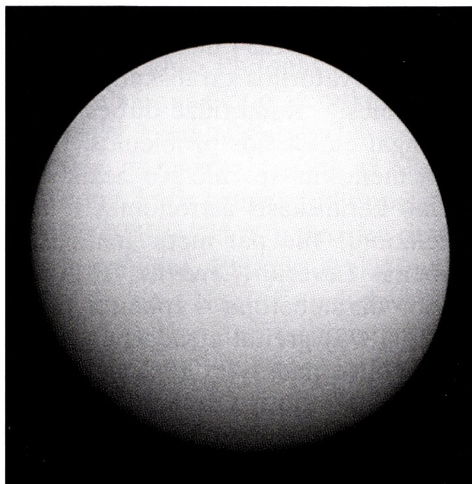
didesnė už Žemės masę. Vidutinis planetos tankis lygus 0,7 g/cm$^3$. O tai yra mažiau už vandens tankį. Pusiaujo skersmuo – 120 660 km, ašigalio – gerokai trumpesnis, t. y. planeta yra labai paplokščia. Taip yra, visų pirma, dėl mažo vidutinio tankio (tuo Saturnas išsiskiria tarp didžiųjų planetų) ir, antra, dėl spartaus sukimosi apie savo ašį. Sukimosi periodas ties pusiauju lygus 10 h 14 min, ties ašigaliais – 26 min ilgesnis.

Saturnas – dujų milžinas, kurio svarbiausia medžiaga yra vandenilis. Jį gaubiančioje storoje ir tankioje atmosferoje yra daugiau metano ir mažiau amoniako negu Jupiteryje. Matyt dėl žemos temperatūros (debesų temperatūra –178 °C) amoniakas Saturno atmosferoje sušąla. Nors Saturno masė 95 kartus didesnė negu Žemės, laisvojo kritimo pagreitis ties paviršiumi beveik toks pat kaip Žemėje, o magnetinis laukas yra kelis kartus stipresnis.

Šioje planetoje nėra dėmių, galinčių prilygti Jupiterio Raudonajai Dėmei, bet apskritai jų yra. Visi dariniai Saturno paviršiuje yra laikini ir greitai kinta.

Pagrindinė Saturno puošmena – jo žiedai, kurie yra labai ploni – tik keleto kilometrų storio, bet išplitę iki 140 000 km virš planetos paviršiaus. Jie sudaryti iš mažų ledo gabaliukų arba dulkių dalelių, padengtų ledu. Kosminės stoties „Vojadžeris-2“ zondas ištyrinėjo Saturno žiedus, taip pat atrado naujų, ne tik Saturno, bet ir kitų šio tipo planetų – Jupiterio, Urano ir Neptūno – žiedų.

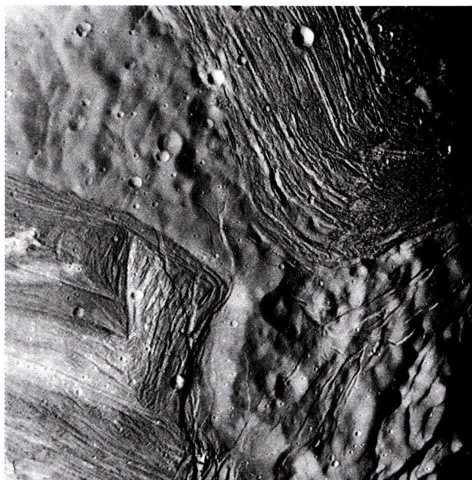
Saturnas turi 18 žinomų gamtinių palydovų (žr. 31 pav. (sp.)).



361 pav.

**Urãną** 1781 m. pirmą kartą aptiko V. Heršelis (*William Herschel*; 1738–1822), gaminęs ir tobulinęs teleskopus. Tai septintoji pagal nuotolį nuo Saulės planeta. Uranas apskrieja Saulę per 84 metus. Tai trečioji pagal dydį planeta. Dydžiu jai beveik prilygsta Neptūnas. Urano skersmuo yra 4 kartus didesnis už Žemės skersmenį, o masė – 14,6 karto didesnė už Žemės masę. Vidutinis jo tankis 1,27 g/cm$^3$. Iš kitų planetų Uranas išsiskiria tuo, kad jo sukimosi ašis yra labai stipriai pasvirusi į orbitos plokštumą, taigi, skriedamas aplink Saulę, Uranas lyg rieda savo orbita (361 pav. ir 32 pav. (sp.)).

Urano debesų temperatūra 55–65 K (maždaug –210 °C), o atmosfera labai stora – apie 11 000 km. Po ja – skysto



362 pav.

vandens, amoniako ir metano vandenynas, kurio gylis 8000 km. Urano centre – maždaug Žemės dydžio branduolys, sudarytas iš silikatų, susimaišiusių su vandens, amoniako ir metano ledais. Medžiagos tankis centre lygus 4,4 g/cm$^3$, temperatūra – maždaug 11 000 K.

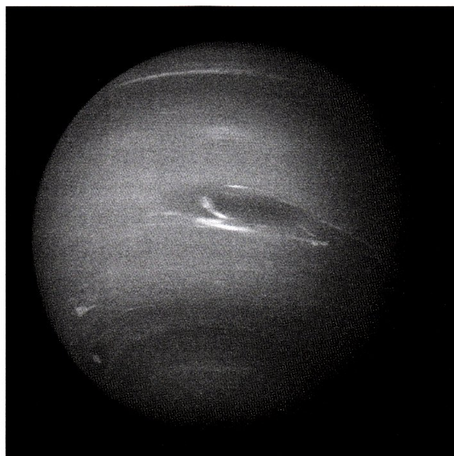
Uraną supa 10 plonų (kelių kilometrų pločio) žiedų, esančių už 40 000–50 000 km nuo planetos centro. Kosminė stotis „Vojadžeris-2“ atrado 10 naujų Urano palydovų, taigi dabar jų žinoma 15 (362 pav. – Miranda). „Vojadžeris-2“ atrado ir tyrė Urano magnetinį lauką, fotografavo jo žiedus, aptiktus 1977 m. kovo mėnesį stebint jį iš Žemės.

**Neptūno atradimas.** Po Urano atradimo atrodė, kad Saulės sistema didžiųjų planetų daugiau neturi, bet po kelerių metų iškilo nauja problema. Mat Uranas judėjo ne taip, kaip tikėtasi: jis nuolat nukrypdavo nuo apskaičiuotos trajektorijos. Prieita prie išvados, kad urano judėjimą trikdo nežinoma anapus jo skriejanti planeta. Šią idėją 1834 m. iškėlė Džordžas B. Eiris (1801–1892), po metų tapęs Grinvičo observatorijos karališkuoju astronomu, deja, šios idėjos plėtotei neskyręs didesnio dėmesio. Kembridže dirbęs Džonas K. Adamsas (*Adams*; 1819–1892) 1843 m. ryžtingai ėmėsi šios problemos. Pagal stebimus Urano judėjimo trikdymus jis per kelis mėnesius apskaičiavo nežinomos planetos padėtį. Tai atlikęs, kreipėsi į Eirį, tačiau karališkasis astronomas ir tada nesiėmė (dėl visokių nesusipratimų) jokių priemonių. Tuo pat metu analogiškus skaičiavimus atliko prancūzų matematikas Urbenas Leverjė (*Leverrier*; 1811–1877) ir nusiuntė juos į Berlyno observatoriją, kurios du stebėtojai – Johanas Galė (*Galle*; 1812–1910) ir Heinrichas d’ Arestas (1822–1875) greitai atrado naują planetą Leverjė apskaičiuotoje vietoje. Šis atradimas buvo padarytas 1846 m. Neilgai trukus, remdamasis Adamso skaičiavimais, Neptūną atrado ir Džeimsas Čalis (*Challis*; 1803–1882) Kembridže. Taigi Neptūno atradėjais laikomi Adamsas ir Leverjė (363 pav. ir 33 pav. (sp.)).

Neptūnas – tai aštuntoji Saulės sistemos planeta, nutolusi nuo Saulės 4,46 mlrd. km perihelyje ir 4,54 mlrd. km afelyje. Jis – beveik Urano brolis dvynys. Jo skersmuo 48 600 km, tankis yra didesnis už Urano (1,64 g/cm$^3$), todėl didesnė ir masė – ji 16 kartų viršija Žemės masę. Skriejimo aplink Saulę periodas lygus 164,8 m, o apie savo ašį jis apsisuka per 17 h 50 min.

Pagrindinius duomenis apie šią planetą pateikė automatinė stotis „Vojadžeris-2“, praskriejusi pro ją 1989 m.

Neptūną, kaip ir kitas didžiąsias planetas, gaubia tanki vandenilio, helio ir metano atmosfera, kurioje plaukia iš amoniako ir vandens ledo kristalų sudaryti debesys. Išorinio debesų sluoksnio temperatūra yra beveik tokia pati, kaip ir Urano, 50–60 K (–220 °C), nors Neptūnas skrieja daug arčiau Saulės. Jo atmosfera labai audringa. „Vojadžerio-2“ perduotose nuotraukose ant mėlyno Neptūno disko matyti šviesesnės ir tamsesnės juostos, atskiri debesys, sukūriai.



363 pav.

Didžiausias sukūrys yra Tamsioji Dėmė, panaši į Jupiterio Raudonąją Dėmę. Neptūne siautėja patys stipriausi vėjai; jų greitis siekia iki 500 m/s (ties pusiauju jie pučia į vakarus, aukštosiose platumose – į rytus).

Atrasti trys Neptūno žiedai (žr. 34 pav. (sp.)), kurie nutolę nuo planetos centro maždaug 42 000–63 000 km. Apie šią planetą skrieja 8 palydovai. Neptūnas turi silpną magnetinį lauką.

**Plutòno mįslė.** Atradus Neptūną, iš naujo buvo apskaičiuotos išorinių planetų orbitos ir vėl rasta nesutapimų su tikruoju jų judėjimu. Persivalis Lovelis (*Lowell*; 1855–1916) iškėlė hipotezę, kad dėl to gali būti kalta dar viena neatrasta planeta. 1930 m., praėjus 14 m. po Lovelio mirties, amerikiečių astronomas K. Tombas šią planetą atrado Lovelio observatorijoje (Arizona, JAV).

Tai pati tolimiausia ir mažiausia Saulės sistemos planeta, kuri skrieja vidutiniškai 5942 mln. km nuotoliu nuo Saulės labai ištęsta ir į ekliptiką labai pasvirusia orbita. Jos nuotolis nuo Saulės perihelyje – 4,5 mlrd. km, o afelyje – 7,4 mlrd. km. Plutonas apskrieja Saulę per 250 metų. Vadinasi, perihelyje Plutonas būna arčiau Saulės negu Neptūnas. Ši planeta net opozicijos metu matoma kaip 14 ryškio žvaigždutė. Tai vienintelė planeta, kurios iki šiol neaplankė kosminės stotys.

Plutono skersmuo lygus maždaug 2200 km. Taigi jis mažesnis ne tik už Merkurijų ir Mėnulį, bet net ir už Neptūno palydovą Tritoną, kuris primena Plutoną. Abu jie panašaus dydžio, temperatūra svyruoja nuo 30 iki 40 K (–235 °C); paviršių dengia metano ledas; jų retą atmosferą sudaro azotas ir metanas. Plutono tankis mažas ($\approx$ 0,8 g/cm$^3$). Manoma, kad tolimoje praeityje abu jie buvo Neptūno palydovai, bet vėliau dėl kažkokios katastrofos Plutonas „pabėgo“ iš Neptūno traukos lauko ir tapo savarankiška planeta, o Tritonas pakeitė skriejimo aplink Neptūną kryptį.

Plutonas turi vieną, palyginti didelį, palydovą Charoną, kurį 1978 m. atrado JAV astronomas Dž. Kristis. Charonas maždaug du kartus mažesnis už Plutoną. Nuotolis tarp abiejų kūnų lygus vos 17 500 km, todėl orbitinis Charono periodas yra 6,4 dienos. Gali būti, kad Charonas atskilo nuo Plutono tada, kai Plutonas buvo išmestas iš Neptūno traukos lauko.

## Klausimai ir užduotys

**1. Senoje astronomijos knygoje parašyta, kad planetų orbitų spinduliams galioja tokia taisyklė: kiekviena kita planeta yra du kartus toliau nuo Saulės nei prieš ją esanti. Naudodamiesi 17 lentele, patikrinkite šį teiginį.**

**2. Nurodykite bendrus Žemės tipo planetų panašumus ir skirtumus.**

**3. Nurodykite bendrus didžiųjų Saulės sistemos planetų panašumus ir skirtumus.**

**4. Kodėl Veneroje negali būti gyvybės, būdingos Žemės planetai? Atsakymą pagrįskite.**

**5. Parašykite referatą tema „Gyvybės atsiradimo Žemėje priežastys ir sąlygos, nulemiančios jos egzistavimą“.**

**6. Parašykite referatą tema „Žemės atmosferos reikšmė gyvybės egzistavimui“.**

## 163. Mažieji Saulės sistemos kūnai

Be devynių didžiųjų planetų, aplink Saulę sukasi dar daug **mažų̃jų planètų, arba asteròidų**, kurių skersmuo ne didesnis kaip 1000 km. Daugelis jų skrieja beveik apskritomis orbitomis tarp Marso ir Jupiterio, tačiau kai kurių orbitos – ištęstos elipsės. Todėl vieni iš asteroidų afelyje nuskrieja iki Saturno, o kiti perihelyje priartėja prie Saulės arčiau negu Žemė, Venera ir net Merkurijus. Du asteroidai atrasti tarp Urano ir Neptūno orbitų. Iki šiol užregistruota daugiau kaip 5000 asteroidų, kurių skersmuo nuo 1 km iki 1000 km. Didieji asteroidai yra beveik apskritos formos. Jie susidarė, matyt, kartu su planetomis. Mažesnieji – netaisyklingos formos luitai – yra didesniųjų asteroidų nuolaužos, atsiradusios šiems susidūrus. Bendra visų asteroidų masė sudaro tik apie 0,0005 Žemės masės. Didžiausi asteroidai yra šie: Cerera – 960 × 910 km dydžio, Paladė – 570 × 530 × 500 km dydžio, Vesta – 580 × 530 × 470 km dydžio, o maždaug dviejų šimtų asteroidų skersmuo – didesnis negu 100 km. Net ir didžiausi asteroidai nematomi plika akimi, tačiau kai kuriuos jų galima įžvelgti pro žiūroną.

Asteroidai pavadinti įžymių žmonių, valstybių, miestų vardais. Yra ir trys „lietuviški" asteroidai: Lietuva, Čiurlionis ir Vilnius. Pirmieji du atrasti 1975 m., o trečiasis – 1978 m. Krymo astrofizikos obsevatorijoje. Kai kurie asteroidai praskrieja netoli Žemės, kartais net arčiau negu Mėnulis.

1991 m. amerikiečių kosminė stotis „Galilėjus" pirmą kartą perdavė į Žemę asteroido Gaspros nuotraukas (žr. 35 pav. (sp.)). Tai akmeninis 12 × 19 km dydžio luitas, kurio paviršiuje matyti daug apskritų kraterių.

Asteroidų kilmė iki šiol tiksliai nėra žinoma. Manoma, kad jie yra skeveldros planetos, kažkada skriejusios aplink Saulę anapus Marso orbitos ir suirusios per kažkokią katastrofą. Labiau tikėtina, kad asteroidai niekada nesudarė vieno didelio kūno; tam trukdė galinga Jupiterio trauka. Be to, net sudėjus visus asteroidus į vieną, neišeitų tokio dydžio arba masės kūnas, kaip Mėnulis (žr. 36 pav. (sp.)).

Kokio dydžio yra mažiausi asteroidai, tiksliai pasakyti negalima, nes sunku nustatyti ribą tarp jų ir **meteoròidų**, kurių skersmuo būna nuo šimtų metrų iki milimetro dalių. Maži asteroidai ir dideli meteoroidai skiriasi tuo, kad pastarieji retsykiais susiduria su Žeme ir įlekia į jos atmosferą, virsdami **bolìdais** arba **meteòrais**. Meteorai („krintančios žvaigždės") matomi tik naktį. Tai į Žemės atmosferą įlėkusio meteoroido ir jo irimo produktų švytėjimas. Dėl didelio greičio ir trinties su oro molekulėmis meteoroidas atmosferoje įkaista, ima lydytis, garuoti ir švytėti. Nedidelis meteoroidas žybteli ir sudega 80–110 km aukštyje. Kai meteoroidas yra vos kelių dešimčių gramų (riešuto dydžio), meteoro ryškis neigiamas (jis vadinamas *bolidù*). Bolidai sudega 60–80 km nuo Žemės aukštyje, o dideli bolidai matomi net dieną. Šimtų gramų, kilogramų ir kelių tonų masės meteoroidai atmosferoje sudega ne visiškai, jų liekanos, vadinamos **meteorìtais**, nukrinta ant Žemės paviršiaus. Jie skirstomi į akmeninius, geležinius ir akmeninius geležinius. Per metus ant Žemės paviršiaus nukrinta 100 000 tonų meteoritų, kurių skersmuo svyruoja nuo kelių metrų iki mikrometrų dalių. Tačiau daugiausia jie pasiekia Žemę dulkių pavidalu. Lietuvoje yra nukritę Andriónìškio (Anykščių̃ r., 1929 m.) ir Žemaĩtkiemio (Ukmergė̃s r., 1933 m.) akmeniniai meteoritai (364 pav.).



364 pav.

Nors ir labai retai, tačiau pasitaiko atvejų, kai Žemė susiduria su stambiu meteoroidu ar mažu asteroidu. Tokie kūnai perskrieja visą atmosferą ir dideliu greičiu trenkiasi į paviršių, išmušdami kraterius (žr. 37 pav. (sp.)), vadinamus *astroblèmomis* („žvaigždžių žaizdomis“). Didžiausių astroblemų skersmuo siekia 100 km. Lietuvoje žinomos 5 km skersmens Mizarų̃ (Lazdìjų r.) ir 8 km skersmens Veprių̃ (Ukmergė̃s r.) astroblemos. Dauguma astroblemų atsirado prieš milijonus metų. Stambaus meteoroido kritimas prieš 65 mln. metų galėjo būti dinozaurų žuvimo priežastimi. Ypač daug panašių į astroblemas meteoritinių smūginių kraterių yra Mėnulyje, Merkurijuje ir planetų palydovuose, kur meteoroidų nestabdo atmosfera. Kartais jų srautai sukelia meteorų lietų (38 pav. (sp.)). Tada per minutę galima pamatyti šimtus ir net tūkstančius meteorų. Tokie meteoroidų srautai susidaro suirus kometoms.

**Komètomis vadinami mažų asteroidų dydžio Saulės sistemos kūnai, kurių išvaizda priklauso nuo atstumo iki Saulės** (39 pav. (sp.)).

Kometos branduolys, arba **kometòidas** (1–50 km skersmens), susideda iš sušalusių dujų, dulkių ir mažų meteoroidų. Kai kometoidas, skriejantis ištęsta elipsine ar paraboline orbita, priartėja prie Saulės tokiu nuotoliu, kaip Jupiteris ar Marsas, sušalusios dujos (metanas, anglies oksidas, amoniakas, cianas, vanduo ir kt.) ima garuoti, ir branduolį apsupa iki 50 000 km skersmens dujų skraistė, vadinama **komètos galvà**. Sproginėdamos įkaitusios dujos išmeta iš branduolio į erdvę anglies bei silikatų dulkių ir mažų akmenėlių. Saulės vėjas ir Saulės šviesos slėgis išstumia iš kometos galvos dalį dujų ir dulkių, kurios sudaro vieną arba kelias **komètos uõdegas**, visada nukreiptas į priešingą Saulei pusę. Jos nutįsusios milijonus kilometrų. Praskriedamas arti Saulės, kometoidas kaskart netenka dalies savo masės. Pagaliau jis suyra ir virsta meteoroidų srautu.

Dauguma kometoidų skrieja prie Saulės beveik parabolinėmis orbitomis. Manoma, kad trilijonai jų spiečiasi *Orto kometoidų debesyje*, kuris iš visų pusių supa Saulės sistemą ir yra nutolęs nuo jos per 50 000–200 000 astronominių vienetų. Juo retkarčiais praskrieja artimiausios Saulei žvaigždės, kurių trauka nukreipia debesyje esančius kometoidus Saulės link. Manoma, kad kitas debesis, žiedo formos, supa planetų sistemą tarp 30 AU ir 200 AU nuo Saulės. Jis vadinamas *Kóiperio debesiu*.

Dalį parabolinėmis orbitomis judančių kometoidų paveikia Jupiterio ir kitų planetų traukos laukas, ir jie pradeda skrieti elipsinėmis orbitomis, kurių afelis būna netoli didžiųjų planetų orbitų (žr. 40 pav. (sp.)). Taip susidaro *periòdinių komètų šeĩmos.*

Kartais kometos branduolys gali susidurti su Žeme. Manoma, kad tai įvyko 1908 m. Sibire, Kámenaja Tungùskos upės rajone.

Kasmet netoli Saulės praskrieja 10–20 parabolėmis judančių kometų. Pastebėtos naujos kometos pavadinamos atradėjo pavarde. Tris kometas yra atradęs Vilniaus astronomas K. Černis. Vienos jų, atrastos 1983 m., branduolio skersmuo yra pats didžiausias (apie 50 km). Iš viso žinoma apie 1000 kometų.

Nuo 1986 m. kometos pradėtos tirti automatiniais kosminiais aparatais. Tais metais pro Halio kometos branduolį praskriejusios trys kosminės stotys – „Vega-1“, „Vega-2“ ir „Džoto“ – nustatė, kad jis panašus į 15 km ilgio ir 10 km pločio bulvę, iš kurios trykšta vandens garų ir anglies dulkių fontanai.

## Klausimai ir užduotys

**1. Kuo panašūs ir kuo skiriasi asteroidai ir kometoidai?**

**2. Kurių Saulės sistemos kūnų pavadinimai susiję su Lietuva?**

# 26 SKYRIUS. ŽVAIGŽDĖS IR SAULĖ

Giedrą naktį toliau nuo miesto žiburių pažvelk į dangų. Jo tamsiai mėlynoje aksominėje erdvėje pamatysi žvaigždes, čia skaisčias, čia blyškias, čia susitelkusias į pažįstamas figūras – žvaigždynus, čia netvarkingai išsisklaidžiusias.

Kiek jų? Iš pirmo žvilgsnio atrodo – nesuskaitoma daugybė ir niekaip negalima jų visų suskaičiuoti, įsiminti. Bet tas įspūdis apgaulingas. Iš tikrųjų paprasta akimi, be žiūrono ir teleskopo matomų žvaigždžių ne taip jau daug: šiauriniame dangaus pusrutulyje jų matyti apie du su puse tūkstančio. Čia yra įvairiausių žvaigždžių, nuo pirmojo iki šeštojo *rỹškio*. **Pirmojo ryškio žvaigždėmis vadinamos pačios ryškiausios žvaigždės.** Tos, kurios šviečia maždaug du su puse karto menkiau, laikomos antrojo ryškio žvaigždėmis ir t. t. – šitaip iki šeštojo ryškio žvaigždžių, dar įžiūrimų akimi. *Šeštojo ryškio žvaigždės šviečia 100 kartų blankiau negu pirmojo ryškio žvaigždės.*

Žinoma, pačios ryškiausios žvaigždės nuo amžių traukė žmogaus dėmesį. Jau gilioje senovėje jos buvo pavadintos tikriniais vardais. Kilę iš senojo Babilono ir Egipto, šie vardai skamba iškilmingai ir kiek paslaptingai: Sìrijus, Altaỹras, Betelgeĩzė, Belatrìkcė, Aldebarãnas... .

Rusų poetas I. Buninas eilėraštyje „Naktis“ pasakoja įspūdžius, kuriuos patiria žmogus, žiūrėdamas į tamsų dangų:

*Dangaus skliaute štai spindi tarsi raštas*
*Kasiopėja, Marsas, Lyra, Orionas.*
*Kaip mėgstu aš stebėt virš dykumų bekraščių*
*Jų paslaptingą nesuprantamą kelionę!*

Beribio kosmoso gyventojos – žvaigždės – ne tik tos, kurios regimos paprasta akimi, bet ir daugybė kitų, matomų pro teleskopą – seniai seniai suskaičiuotos, įrašytos į katalogus.

Sudarydamas pirmąjį didelį žvaigždžių katalogą, daug triūso įdėjo senovės graikų astronomas Hiparchas (II a. pr. Kr.). Jis pirmasis sudarė nuoseklią geocentrinę sistemą, kurią toliau išplėtojo Klaudijus Ptolemėjas. Hiparchas buvo labai išradingas ir sugalvodavo išmoningus eksperimentus, kurie leisdavo jam be teleskopo, tik ilgai stebint, padaryti reikšmingų atradimų. Vieną kartą, stebėdamas dangų, Hiparchas pamatė nežinomą žvaigždę ir, kad sužinotų, ar apskritai pasirodo naujų žvaigždžių, ėmė užrašinėti jam žinomų žvaigždžių padėtis. Taip atsirado pirmasis Europoje žvaigždžių katalogas.

Istorikai vertina Hiparchą labiau negu kitus senovės astronomus – tokie dideli jo nuopelnai astronomijai, tačiau apie jo gyvenimą žinoma be galo mažai. Mūsų nepasiekė netgi tiksli jo gimimo ir mirties data, tiktai žinoma, kad dangų jis stebėjo Aleksandrijoje, Bitinijoje ir Rodo saloje, kur pastatė observatoriją.

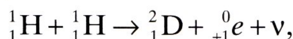
Į savo katalogą jis įtraukė 1022 žvaigždes ir pagal jų spindesį parinko ryškio lygį.

Jei įsivaizduosite, kokie netobuli buvo tuometiniai matavimo prietaisai, suprasite Hiparcho nuveikto darbo dydį. Matuoti reikėjo daugelį kartų, kad būtų gautas vidutinis – pats tiksliausias rezultatas. Hiparcho darbai – neįkainojama paslauga vėlesnių laikų astronomams.

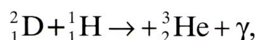
## 164. Kas yra žvaigždės

*Žvaigždės yra didelės masės ir skersmens įkaitusios plazmos rutuliai, susidarę iš vandenilio ir helio su nedidele sunkesniųjų elementų priemaiša.* Žvaigždės skleidžia elektromagnetinius spindulius (šviesos, ultravioletinius, rentgeno ir infraraudonuosius), elektringąsias daleles (daugiausia protonus ir elektronus) ir neutrinus. Žvaigždę kaitina ties jos centru ir aplink jį vykstančios termobranduolinės reakcijos tarp vandenilio, helio, anglies, azoto, deguonies ir kitų elementų atomų branduolių. Reakcijos vietoje temperatūra siekia 10–100 mln. K.

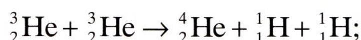
Daugumos žvaigždžių gelmėse vyksta branduolinės reakcijos, kurių metu keturi vandenilio atomo branduoliai – protonai $\left({}_1^1\mathrm{H}\right)$ – susijungia į vieną helio atomo branduolį – helioną $\left({}_2^4\mathrm{He}\right)$ pagal tokią reakcijų seką:



$${}_1^1\mathrm{H}+{}_1^1\mathrm{H}\rightarrow{}_1^2\mathrm{D}+{}_{+1}^{\;0}e+\nu,$$



$${}_1^2\mathrm{D}+{}_1^1\mathrm{H}\rightarrow+{}_2^3\mathrm{He}+\gamma,$$



$${}_2^3\mathrm{He}+{}_2^3\mathrm{He}\rightarrow{}_2^4\mathrm{He}+{}_1^1\mathrm{H}+{}_1^1\mathrm{H};$$

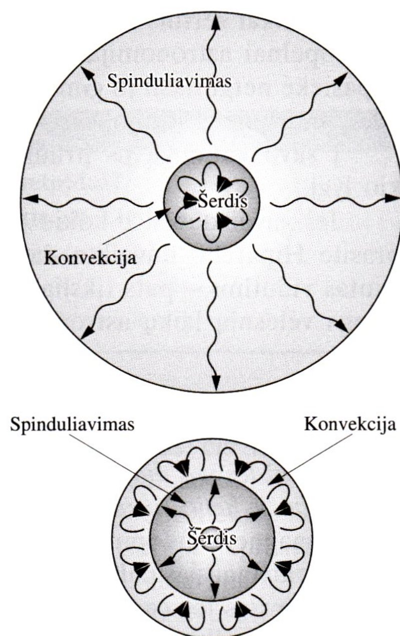
čia ${}_1^2\mathrm{D}$ yra sunkiojo vandenilio – deuterio – atomo branduolys, ${}_2^3\mathrm{He}$ – lengvojo helio atomo branduolys, ${}_{+1}e$ – pozitronas (elektrono antidalelė), $\nu$ – neutrinas, o $\gamma$ – elektromagnetinių gama spindulių fotonas. Pirmosios reakcijos metu susidaręs neutrinas šviesos greičiu perskrodžia visą žvaigždę ir išlekia į erdvę, o pozitronas susiduria su elektronu ir anihiliuoja – virsta dviem ar trimis gama spindulių fotonais.

Todėl reakcijos metu išsiskyrusią energiją sudaro elektromagnetinių fotonų energija ir kinetinė protonų energija.

Keturių protonų rimties masė, išreikšta atominiais masės vienetais, yra lygi: $4\ m_p = 4 \times 1{,}007825 = 4{,}03130$, o vieno $^4_2$He branduolio masė – $m_{^4_2He} = 4{,}00268$. Masės skirtumas, lygus 0,02826 atominės masės vienetų, reakcijos metu virsta energija. Tai sudaro 0,71% pradinės vandenilio masės. Vadinasi, jei 1 g vandenilio virsta heliu, tai 0,0071 g medžiagos – energija. Prisiminę A. Einšteino formulę (§ 110; 261), gauname, kad $E = 0{,}0071\ (3 \cdot 10^{10})^2 = 6{,}4 \cdot 10^{11}$ J.

Saulė – vidutinio šviesumo žvaigždė; jos spinduliavimo galia lygi $3{,}84 \cdot 10^{26}$ W. Saulės gelmėse per 1 sekundę 623 mln. t vandenilio virsta heliu, iš jų 4,4 mln. t – energija. Maždaug 3% šios energijos išsineša neutrinai, o likusią dalį Saulė išspinduliuoja.

Branduolinės reakcijos metu atsiradusi energija iš žvaigždės gelmių skverbiasi į paviršių dviem būdais – **konvèkcija ir spinduliãvimu** (365 pav.). *Konvekcija yra įkaitusių medžiagos masių judėjimas į žvaigždės išorę, vėsesnėms masėms slenkant centro link. Spindulinis energijos sklidimas vyksta tada, kai atomai sugeria ir vėl išspinduliuoja iš žvaigždės vidaus sklindančius elektromagnetinius spindulius.* Fotonas, susidaręs žvaigždės centre, pasiekia jos paviršių ne iš karto, o po daugybės absorbcijos ir emisijos procesų, trunkančių apie milijoną metų. Perspinduliavimo būdu aukštyn besiskverbiančių fotonų energija mažėja – gama spinduliai virsta ultravioletiniais, regimaisiais arba infraraudonaisiais spinduliais.




365 pav.

Žvaigždės medžiagos tankis išorės link mažėja, pvz., Saulės centre tankis yra apie 160 g/cm$^3$, o paviršiuje jis sumažėja iki $10^{-7}$–$10^{-8}$ g/cm$^3$ (žinome, kad oras ties Žemės paviršiumi yra $10^4$–$10^5$ kartų tankesnis). Pasiekę tokius netankius sluoksnius, spinduliai jau nekliudomi sklinda iš žvaigždės. Šis **žvaigždės atmosferos sluoksnis matomas kaip spindintis jos paviršius ir vadinamas fotosferà**. Skirtingų žvaigždžių paviršiaus (fotosferų) temperatūra yra nuo 1500 K iki 50 000 K, o jų centro temperatūra – 10 100 mln. K.

Praleidę žvaigždės šviesą pro spektrografą, gausime jos spektrą, t. y. įvairiaspalvę žvaigždės šviesą, išskaidytą pagal bangų ilgį. Trumpiausios yra violetinės spektro srities elektromagnetinės bangos (400–430 nm), toliau eina mėlynieji spinduliai (430–490 nm), žalieji spinduliai (490–550 nm), geltonieji spinduliai (550–590 nm), oranžiniai spinduliai (590–610 nm) ir raudonieji spinduliai (610–700 nm). Trumpesni už violetinius – tai akiai nematomi ultravioletiniai spinduliai, o ilgesni už raudonuosius – infraraudonieji spinduliai. Kiekvienos žvaigždės spektrą sudaro **ištisìnė spinduliuotė** ir įvairių cheminių elementų **sugertiẽs lìnijos**. Energijos pasiskirstymas ištisiniame žvaigždės spektre priklauso nuo jos paviršiaus temperatūros – karštesnė žvaigždė spinduliuoja daugiau mėlynųjų, violetinių ir ultravioletinių

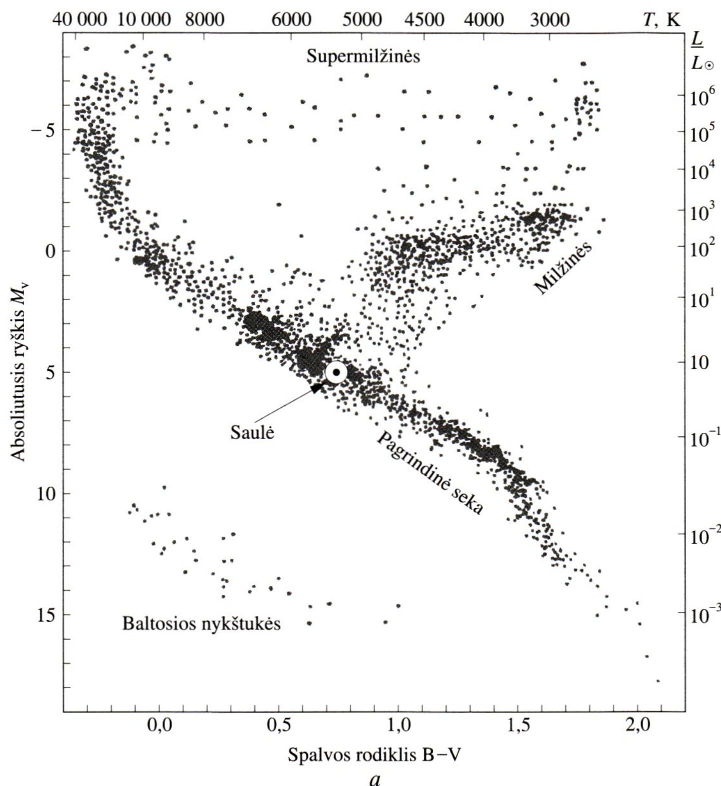
spindulių, o vėsesnė – daugiau žaliųjų, geltonųjų, raudonųjų ir infraraudonųjų spindulių. *Tai lemia žvaigždės regimąją spalvą.* Net plika akimi matome, kad Vega yra balta, Tikutis – geltonas, Arktūras – rausvas, o Betelgeizė – raudona (41 pav. (sp.)). Žvaigždės temperatūra nustatoma arba išmatavus bangos ilgį, kuriame jos šviesa stipriausia, arba išsiaiškinus, kurių cheminių elementų sugerties linijos sudaro žvaigždės spektrą.

Pirmieji žvaigždžių šviesos tyrimai, kuriuos atliko Andželas Sekis (*Secchi*; 1818–1878) Italijoje ir Viljamas Haginsas (*Huggins*; 1824–1910) Anglijoje, parodė, kad žvaigždes galima suskirstyti į kelias gan griežtas **spektrinès klasès**. Dabar naudojama sistema (366 pav.) buvo sukurta Harvardo observatorijoje (JAV), vadovaujant Edvardui Pikeringui (1846–1919). Spektrinės klasės žymimos didžiosiomis lotyniškos abėcėlės raidėmis *O*, *B*, *A*, *F*, *G*, *K* ir *M*. Pačių karščiausių *O* spektrinės klasės žvaigždžių paviršiaus temperatūra siekia 50 000 K, *B* spektrinės klasės žvaigždžių – nuo 25 000 K iki 10 000 K, *A* spektrinės klasės žvaigždžių – nuo 10 000 K iki 7500 K, *F* spektrinės klasės žvaigždžių – nuo 7500 K iki 6000 K, *G* spektrinės klasės žvaigždžių – nuo 6000 K iki 5200 K, *K* spektrinės klasės žvaigždžių – nuo 5200 K iki 3600 K ir *M* spektrinės klasės žvaigždžių – nuo 3600 K iki 1500 K. Žvaigždės temperatūra lemia jos spalvą: *O*, *B* ir *A* spektrinių klasių žvaigždės yra baltos arba žydrai baltos, *F* ir *G* – geltonos spalvos, *K* – oranžinės spalvos, likusios žvaigždės – raudonos spalvos. Spektrinės klasės dar skirstomos į 10 poklasių, kurie žymimi arabiškais skaitmenimis, pvz., *G*0 – karščiausia tarp *G* žvaigždžių, *G*5 – viduryje tarp *G*0 ir *K*0. Saulė yra *G*2 spektrinės klasės žvaigždė. Paprastai sekos pradžioje esančios žvaigždės vadinamos ankstyvųjų, o pabaigoje esančios (*K*, *M*, *R*, *N* ir *S*) – vėlyvųjų spektrinių klasių žvaigždėmis. Tačiau Harvarde nustatyta spektrinių klasių seka žvaigždžių evoliucijos neatspindi, nes viskas yra kur kas sudėtingiau, negu tada manyta.

1908 m. danų astronomas Einaras Hercšprungas (1873–1967) sudarė diagramą, kurioje sužymėjo žvaigždes pagal jų spektrinę klasę ir *šviesį*. **Žvaigždės spindesys, išreikštas Saulės spindesio vienetais, vadinamas žvaigždễs šviesiù.** JAV tą patį padarė Henris Raselas (1877–1957). Todėl diagrama dabar vadinama Hercšprungo ir Raselo vardu, arba sutrumpintai – *H–R* diagrama (366 pav., *a* ir *b*).

Iš 366 paveikslo, *a*, matyti, kad žvaigždės joje nėra pasiskirsčiusios tolygiai: didžioji dauguma žvaigždžių sudaro ryškią juostą, besitęsiančią nuo kairiojo viršutinio kampo iki dešiniojo apatinio kampo. Ji vadinama **pagrindinè sekà** (366 pav., *b*), kuri nuo karštų ir didelio šviesio *O* spektrinės klasės žvaigždžių tęsiasi vėsių mažo šviesio *M* spektrinės klasės žvaigždžių link. Saulė – tipiška pagrindinės sekos žvaigždė, esanti maždaug jos viduryje. *G–K–M* spektrinių klasių pagrindinės sekos žvaigždės dar vadinamos **nykštùkėmis**, nes jų skersmuo mažesnis negu Saulės.

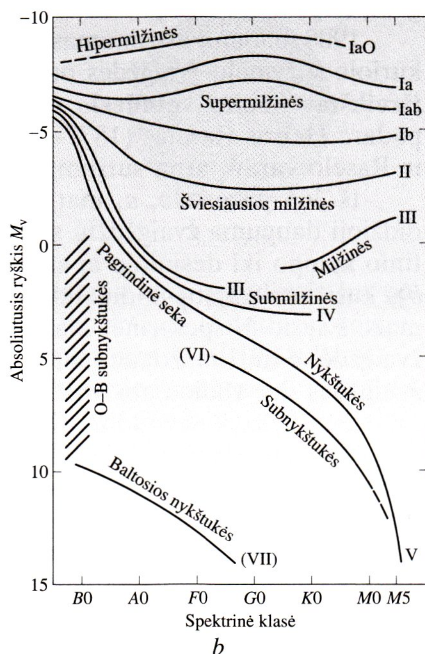
Paaiškėjo, kad raudonosios, oranžinės, iš dalies ir geltonosios žvaigždės, t. y. nuo *G* spektrinės klasės iki sekos galo, diagramoje grupuojasi į dvi sekas – milžines ir nykštukes. Kaip pavyzdį aptarkime dvi *M* spektrinės klasės žvaigždes – Oriono Betelgeizę ir mūsų artimiausią kosminę kaimynę Kentauro Proksimą. Šių žvaigždžių paviršiai įkaitę beveik vienodai, bet jų panašumas tuo ir baigiasi. Betelgeizės skersmuo yra maždaug 420–560 mln. km, taigi jos viduje laisvai tilptų visa Žemės orbita. Betelgeizė yra 10 000 kartų šviesesnė negu Saulė. Tuo tarpu Proksimos skersmuo nesiekia milijono kilometrų, o jos spinduliavimas yra 10 000 kartų silpnesnis negu Saulės.




*a*

Nuo pagrindinės sekos vidurio atsiskiria **submilžinių ir raudonųjų milžinių** seka, kuri kyla aukštyn į dešinę pusę, kol pasiekia $M = -1$ lygį (366 pav., *b*). Diagramos viršutinę dalį virš $M_v = -5$ užima **supermilžinių ir hipermilžinių** sekà, išsidėsčiusi tarp karščiausių ir vėsiausių žvaigždžių. Tarp milžinių ir supermilžinių yra **šviesiųjų milžinių** seka. Žemiau *F*5–*G*–*K* spektrinių klasių nykštukių sekos prasideda beveik lygiagreti jai **subnykštùkių** seka, kuri taip pat maždaug lygiagreti pagrindinei sekai, bet yra 10 ryškių žemiau. **Žvaigždės absoliučiúoju ryškiù *M* vadinamas jos regimasis ryškis, kurį ji turėtų, jei būtų nutolusi nuo Žemės 10 pc atstumu. Absoliutusis ryškis apibūdina žvaigždės spinduliãvimo galią arba absoliùtųjį spiñdesį.**

*H*–*R* diagramos klasės dar vadinamos **šviesio klasėmis**: pagrindinė seka atitinka V šviesio klasę, submilžinių – IV klasę, milžinių – III klasę, šviesiųjų milžinių – II klasę ir supermilžinių – I šviesio klasę.




*b*

366 pav.

## Klausimai ir užduotys

**1. Kodėl atomų branduolių reakcijos, kurių metu išsiskiria energija, vyksta žvaigždžių gelmėse?**

**2. Kurios žvaigždės yra didžiausios ir kurios – mažiausios?**

**3. Kodėl masyvios žvaigždės greičiau už mažas žvaigždes išeikvoja branduolinį kurą?**

**4. Kodėl dauguma žvaigždžių yra pagrindinėje Hercšprungo ir Raselo diagramos sekoje?**

# 165. Saulė – artimiausioji mūsų žvaigždė

Saulė yra viena iš maždaug 200 milijardų mūsų Galaktikos žvaigždžių. Visatos mastu Saulės vaidmuo nereikšmingas – ji viso labo tik geltonos *G* spektrinės klasės nykštukė. Tačiau mūsų planetų šeimoje – Saulės sistemoje – Saulė yra pagrindinis, viską lemiantis dangaus kūnas.

Saulė daug didesnė už Žemę. Ją sudaro vandenilis ir helis. Saulė tokia didelė (skersmuo – 1 392 000 km), kad į ją tilptų daugiau negu milijonas Žemės dydžio kūnų, tačiau jos masė tik $1{,}99 \cdot 10^{30}$ kg, t. y. maždaug 333 000 Žemės masių. Taip yra todėl, kad Saulės tankis daug mažesnis negu Žemės tipo planetų. Vidutinis Saulės tankis yra 1,409 g/cm$^3$, taigi jis 1,409 karto didesnis už vandens tankį. Saulės medžiaga pasiskirsčiusi nevienodai: einant gilyn, tankis didėja.

Saulė skrieja 32 000 šviesmečių nuotoliu nuo Galaktikos centro ir vieną ratą aplink Galaktikos centrą padaro per 225 mln. metų. Jos sukimosi apie ašį periodas ties pusiauju lygus 25,4 paros. Kadangi Saulė nesisuka kaip kietasis kūnas, todėl ties ašigaliais šis periodas gerokai ilgesnis.

Saulės centre yra $0{,}35R_{\odot}$ šerdìs, kurios temperatūra siekia 15 mln. K. Čia vyksta branduolinės reakcijos ir išsiskiria energija. Elektromagnetinėmis bangomis ir neutrinais Saulė spinduliuoja $3{,}84 \cdot 10^{26}$ W galios energiją. Iš Saulės sklindantys elektromagnetiniai spinduliai po 8,3 min pasiekia Žemę. Už atmosferos ribų į 1 m$^2$ plotą, statmeną Saulės spinduliams, krinta 1,367 kW energijos srautas. Šios energijos pakanka, kad Žemėje galėtų egzistuoti gyvybė.

Saulės šerdį supa maždaug $0{,}5R_{\odot}$ storio sluoksnis, kuriuo energija pernešama į išorę spinduliais. Virš jo – išorinis $0{,}15R_{\odot}$ storio sluoksnis, kuriuo energija pernešama dujų konvekcija, karštesnėms masėms kylant aukštyn, o vėsioms – leidžiantis žemyn. Šis reiškinys vadinamas *granuliãcija*.

**Fotosferà vadinamas ryškus išorinis Saulės sluoksnis, kurio temperatūra 5500 °C.** Jame matomos tamsios sritys, vadinamos **Sáulės dėmėmìs**. Iš tikrųjų jos nėra juodos, bet tokios atrodo dėl kontrasto: jei galima būtų stebėti izoliuotą dėmę, ji šviestų ryškiau negu lankinė lempa.

Saulė nėra glotni, jos paviršius išmargintas grãnulių, kurių kiekviena yra maždaug 1500 km skersmens (žr. 42 pav. (sp.)). Po išoriniais Saulės sluoksniais cirkuliuoja konvekcinės srovės. **Grãnulės – tai apie 1000 km skersmens karštų dujų burbulai (fontanai), kylantys iš gelmių aukštyn maždaug 400 m/s greičiu.** Tamsūs granulių kraštai – gilyn grimstančios jau atvėsusios dujos.

Fotosferoje matoma tipiška didelė Saulės dėmė susideda iš centrinio tamsaus šešėlio ir kiek šviesesnio jį gaubiančio pusšešėlio. Saulės dėmių forma labai netaisyklinga (žr. 43 pav. (sp.)). Daugiausia jos pasirodo grupėmis, kuriose išsiskiria dvi pagrindinės dėmės – *vedančiòji ir atsiliẽkančioji*. Kai kurios dėmių grupės užima didžiulius plotus, yra labai sudėtingos ir egzistuoja trumpai. Net labai didelė dėmių grupė gyvuoja tik kelis mėnesius, o mažos dėmės išnyksta per kelias valandas.

Virš Saulės fotosferos prasideda **chromosferà**, kuri tęsiasi iki 4000 km aukščio. Šiame sluoksnyje dujos yra daug retesnės negu fotosferoje, bet jų kinetinė temperatūra daug aukštesnė (ties chromosferos išoriniu pakraščiu ji siekia 50 000 K). Dėl to daugelis atomų yra jonizuoti – netekę nuo vieno iki kelių elektronų. Chromosferos dujų spektras emisinis, todėl ji ypač gerai matoma visiško Saulės užtemimo metu palei Mėnulio kraštą, kaip oranžinės spalvos žiedelis. Chromosferą galima nufotografuoti ir ne užtemimo metu, naudojant labai siaurus šviesos filtrus, praleidžiančius tik vieną spektro liniją, pvz., vandenilio arba kalcio.

Nuotraukose matyti gana margas chromosferos paviršius, primenantis fotosferos granuliaciją. Šviesesnes granules supa tamsesnės pailgos **spikùlės**, panašios į žolės kupstus (žr. 44 pav. (sp.)).

4000 km aukštyje virš fotosferos chromosfera laipsniškai pereina į Saulės **vainìką**, kurio sidabriška šviesa visiško užtemimo metu supa visą Saulę ir nusitęsia į erdvę kartais net per kelis Saulės spindulius (žr. 45 pav. (sp.)). Toliau vainikas pereina į Saulės vėją ir Zodiako šviesą. Saulės vėjas – elektronų, protonų ir atomų branduolių srautas – „išpučia“ iš Saulės per metus apie $10^{-14}$ $M_{\odot}$ masės. Tolstant nuo Saulės, dujų kinetinė temperatūra vainike kyla ir pasiekia net 1–2 mln. K. Tokioje temperatūroje dujų atomai labai jonizuoti – kai kurie iš jų yra netekę net 16 išorinių elektronų.

Apibendrinant galima teigti, jog *Saulės šerdį, kurioje vyksta branduolinės reakcijos ir išsiskiria energija, supa 3 sluoksniai: pirmuoju energija pernešama į išorę spinduliais, antruoju – dujų konvekcija, o trečiasis sluoksnis – tai atmosfera, kurią galima suskirstyti į fotosferą, chromosferą ir vainiką.*

Saulės paviršiuje maždaug kas 11,2 metų vyksta reiškiniai, susiję su jos aktyvumo kitimu. Tai *Saulės fotosferos dėmės, žibintai, chromosferos flokùlai ir žybsniai, vainiko protuberántai* (žr. 46 pav. (sp.)).

Kaip jau buvo minėta, **Saulės dėmėmis vadinamos tamsios fotosferos sritys, apsiaustos šviesesnio pusšešėlio**. Dažniausiai jos atsiranda poromis ir grupėmis. Aplink dėmes susidaro trumpalaikiai šviesūs dariniai – žibintai, o virš jų, chromosferoje – flokulai, protuberantai ir žybsniai. **Protuberántais vadinamos Saulės disko pakraštyje matomos į vainiką besiveržiančios dujų masės.** Chromosferos žybsniai trunka keletą valandų. Jie sukelia radijo ryšio trikdymus, polines pašvaistes, magnetines audras. Šie reiškiniai veikia Žemės klimatą, augmeniją, gyvūniją ir žmones.

## Klausimai ir užduotys

1. **Kurios žvaigždžių savybės būdingos Saulei?**
2. **Kas yra Saulės aktyvumas ir koks jo poveikis Žemei?**

# 166. Žvaigždžių evoliucija

XX amžiaus pradžioje daugelis astronomų manė, kad žvaigždės evoliucionuoja taip, kaip rodo *H–R* diagrama, t. y. evoliucijos pradžioje jos yra baltos ir spindulingos, o pabaigoje – raudonos ir silpnos. Pagal šią teoriją žvaigždė atsiranda, kondensuojantis tarpžvaigždinėms dujoms ir dulkėms. Veikiant gravitacijai, šis dulkių ir dujų gumulas traukiasi, jo gelmės kaista. Žvaigždė pradeda šviesti kaip didžiulė labai išsiplėtusi *M* spektrinės klasės raudonoji milžinė. Ji traukiasi ir kaista tol, kol pasiekia pagrindinės žvaigždžių sekos viršų, paskui vėsta, kol virsta blyškia *M* spektrinės klasės nykštuke. Galiausiai ji visai atšąla.

Tokia iš pažiūros gan įtaigi žvaigždžių evoliucijos teorija nėra visai teisinga. Raudonosios milžinės, tokios kaip Betelgeizė, nėra jaunos. Priešingai, jos labai senos, išeikvojusios energijos atsargas, taigi pasiekusios paskutiniąją evoliucijos stadiją. Kadangi žvaigždė spinduliuoja energiją, gautą jų gelmėse vykstančių branduolinių reakcijų metu, o evoliuciją lemia pradinė iš kosminio ūko susidariusios žvaigždės masė, tai didelės ir mažos žvaigždės evoliucija skiriasi. Vienintelis bendras jų evoliucijos bruožas yra tas, jog visos žvaigždės susidaro iš dujų ir dulkių debesų, tarp kurių geriausiai žinomas Didysis Oriono (liet. – Šienpjovių) ūkas.

Traukdamasis žvaigždės branduolys kaista, bet jei jo masė pernelyg maža, branduolinės reakcijos „neįsidega“. Užuot pasiekusi pagrindinę seką, žvaigždė kurį laiką blausiai spinduliuoja, kol išeikvoja visą energiją. Jei žvaigždė yra Saulės masės, dėl gravitacijos ji traukiasi iki to momento, kai karštis iš vidaus konvekcijos būdu pasiekia paviršių. Per trumpą laiką (per kelis šimtus metų) žvaigždė tampa 100–1000 kartų šviesesnė už dabartinę Saulę. Iš pradžių šitaip sužibusi, ji toliau traukiasi, šviesis mažėja, ir žvaigždė artėja prie pagrindinės sekos. Po to, kai pakankamai pakyla branduolio temperatūra, jame prasideda branduolinės reakcijos. Vandenilio branduoliams jungiantis į helio branduolius, tam tikra masės dalis virsta energija. Žvaigždė atsiduria pagrindinėje sekoje ir ilgą laiką (apie 10 milijardų metų) būna stabili. Saulė, kurios amžius maždaug 5 milijardai metų, yra pusamžė pagrindinės sekos žvaigždė.

Pagaliau vandenilinio kuro ištekliai ima sekti, ir žvaigždė pradeda kisti. Helio branduolys staiga susitraukia ir dar kartą smarkiai įkaista. Dėl to branduolį gaubiančiame apvalkale esantis vandenilis ima degti, o išoriniai žvaigždės sluoksniai plečiasi ir vėsta. Žvaigždė išsiplečia ir virsta **raudonąja milžine**. Temperatūra jos gelmėse pakyla iki 100 mln. laipsnių, nors išoriniai sluoksniai yra šalti ir labai reti.

Žvaigždėje vyksta dar ir kitokios reakcijos, kol pagaliau visi branduolinės energijos ištekliai išsenka, ir žvaigždė *kolapsúoja* (lot. *collapsus* – nusilpęs, subliūškęs – labai staigus žvaigždės traukimasis) į mažą tankią **báltąją nykštùkę**. Ją sudarantys atomai sugniuždomi ir taip susiglaudžia, kad medžiagos tankis 100 000 ir net daugiau kartų viršija vandens tankį. Baltoji nykštukė ilgai spinduliuoja šviesą ir šilumą, kol pagaliau tampa negyva **juodąja nykštukè**.

Juodosios nykštukės nespinduliuoja, jų negalima aptikti, todėl apie jas nieko nežinoma ir tik spėliojama, kiek jų yra. O baltųjų nykštukių yra nemažai. 1916 m. Valteris Adamsas (1876–1956) įrodė, kad Sirijaus palydovas, kurį daugiau kaip prieš 50 metų atrado Alvanas Klarkas (1832–1897), turi būti baltoji nykštukė, o ne šalta

raudonoji žvaigždė, kaip iki tol manyta. Sirijaus palydovo paviršiaus temperatūra aukštesnė negu Saulės, bet jo skersmuo vos trigubai didesnis už Žemės skersmenį. Vadinasi, mažame jo tūryje „supresuotas" milžiniškas medžiagos kiekis – beveik tiek, kiek jos yra Saulėje. Kitos baltosios nykštukės yra dar tankesnės.

Žvaigždė, kurios masė yra didesnė negu Saulės, evoliucionuoja daug sparčiau, todėl labai masyvios žvaigždės kolapsas baigiasi kitaip, negu čia aprašytas traukimasis į baltąją nykštukę. Kai branduolio temperatūra pasiekia 5 mlrd. laipsnių, žvaigždės struktūra katastrofiškai pakinta: branduolys kolapsuoja, o išoriniai sluoksniai, kuriuose tebevyksta branduolinės reakcijos, staigiai įkaista maždaug iki 300 mln. laipsnių. Dėl to žvaigždė sprogsta kaip **supernovà**. 47 spalvotame paveiksle parodyta Heraklio nova prieš sprogimą 1934 m. ir po jo. Po katastrofos žvaigždės vietoje lieka besiplečiantis dujų debesis, kurio viduje slypi **neutròninė žvaigždē arba pulsãras**. Supernovos liekana yra garsusis Krabo ūkas; 1054 m. jos sužibimą stebėjo kinų astronomai (48 pav. (sp.)).

## Klausimai ir užduotys

**1. Kodėl didelių ir mažų žvaigždžių evoliucija skirtinga? Atsakymą pagrįskite.**

**2. Koks yra bendras visų žvaigždžių evoliucijos bruožas?**

**3. Nurodykite raudonųjų milžinių, baltųjų ir juodųjų nykštukių ir supernovų skiriamuosius ypatumus.**

## 167. Ūkai, pulsarai ir juodosios skylės

Tarpžvaigždiniai *ūkaĩ (kòsminiai dēbesys)* yra įvairūs ir nepaprastai svarbūs šiuolaikinės astronomijos tyrimo objektai. Kai kurie jų matomi įvairiose dangaus vietose kaip šviesios dėmelės, panašios į švytinčią miglą. Astronomai susitarė **ūkaĩs vadinti tik dujų ir dulkių debesis**. 49 spalvotame paveiksle parodytas Arklio Galvos tamsusis ūkas Šienpjovių žvaigždyne.

Galaktiniai ūkai yra dviejų pagrindinių tipų: *emìsiniai ir ãtspindžio*. Ir vieni, ir kiti stebimi ne tik Paukščio Tako, bet ir kitose galaktikose. Vadinamasis *Tarantùlo ū̃kas* yra Didžiajame Magelano Debesyje. Tai daug didesnis už Oriono ūką ir geriausiai žinomas iš visų mūsų Galaktikos ūkų.

Visų ūkų pagrindas – vandenilis – labiausiai paplitęs Visatoje cheminis elementas. Be to, ūkuose yra daug dulkių, kurios sugeria žvaigždžių šviesą. Kai kuriuose ūkuose slypi objektai, kurių pamatyti neįmanoma, bet galima nufotografuoti jų skleidžiamus infraraudonuosius spindulius. Toks yra, pvz., Beklino objektas Oriono ūke, kuriame yra nepaprastai spindulinga žvaigždė, visiškai pasislėpusi nuo mūsų.

Patys ūkai yra milžiniški, bet medžiaga, iš kurios jie sudaryti, labai reta. Tarpžvaigždinės dujos yra milijonus kartų retesnės už orą, kuriuo mes kvėpuojame.

Ūkai švyti dėl žvaigždžių, spindinčių netoliese. Jei žvaigždės labai karštos, spinduliuodamos jos sužadina ūko vandenilio dujas, kurios pačios ima švytėti. Jei žvaigždės vėsesnės, ūkas tik atspindi jų šviesą. Jei šalia ūko žvaigždžių nėra, jis visai nešviečia. Ūkas būna tamsus ir pastebimas todėl, kad sulaiko anapus jo esančių žvaigždžių šviesą.

Vadinasi, žvaigždės susidaro iš besitraukiančios ir tankėjančios tarpžvaigždinės medžiagos – ūkų, tokių, kaip Oriono, Lagūnos, Trilypio ir kt. Žvaigždės susidaro ir kitur, pvz., Didžiajame Magelano Debesyje ar spiraliniame Andromedos ūke. Tamsios ūkų dėmelės, vadinamosios *globùlės*, tikriausiai yra žvaigždžių užuomazgos.

Ūkuose gausu žvaigždžių, kurių spindesys kinta. Jos vadinamos kintamosiomis ir turbūt yra ankstyvųjų evoliucijos stadijų žvaigždės, dar tebesitraukiančios ir artėjančios prie pagrindinės sekos. Pastebėta, kad per kelis metus kai kurių žvaigždžių šviesis padidėja. Matyt, tai vyksta todėl, kad žvaigždės numeta jas gaubusius pirminius dulkių apvalkalus.

Norėdami išsiaiškinti, kas yra *juodóji skylẽ*, prisiminkime ką tik aptartą žvaigždžių evoliucijos teoriją. §166 teigėme, kad didesnės masės žvaigždė, pasibaigus branduoliniam kurui, sprogsta kaip supernova. **Evoliucionuojanti spindulinga žvaigždė virsta neutrònine žvaigždè arba pulsarù, kurį gaubia besiplečiantis dujų apvalkalas**.

Baltosios nykštukės atomai sugniuždomi ir taip suglaudžiami, kad laisvos erdvės tarp jų beveik nelieka. Neutroninės žvaigždės gravitacijos laukas toks stiprus, kad elektronai įsiterpia į protonus ir sudaro neutronus. Neutroninės žvaigždės tankis daug didesnis negu baltosios nykštukės. Dabar praktiškai nėra jokių abejonių, kad radijo šaltiniai, vadinami pulsarais, iš tikrųjų yra neutroninės žvaigždės.

Žvaigždei kolapsuojant, jos tankis tampa toks, kaip baltosios nykštukės ar neutroninės žvaigždės, o vėliau ji traukiasi (vėl mažėdama ir tankėdama), kol pasiekia vadinamąją gravitacinio kolapso būseną, kuriai esant jokie žinomi fizikiniai procesai jos traukimosi nebesustabdo. Šviesa vis sunkiau išeina iš kolapsuojančios žvaigždės, jos matmenys netrukus įveikia kritinę ribą, vadinamą *Švárcšildo spiñduliu*. Tada žvaigždės gravitacinis laukas tampa toks stiprus, kad net šviesos spindulys nebegali iš jo ištrūkti. Žvaigždę tarytum gaubia kažkokia zona, iš kurios niekas negali pabėgti. Tai ir yra juodoji skylė.

Juodosios skylės viduje jokie įprasti fizikos dėsniai nebegalioja. Buvo iškelta hipotezė, jog kolapsavusi žvaigždė, ko gera, išvis nebeegzistuoja; spėliota, kad juodosios skylės gali didėti, kol praris visa, kas yra Visatoje. Bet tai tik spėlionės, neturinčios mokslinio pagrindimo.

# 27 SKYRIUS. GALAKTIKA. VISATA IR JOS EVOLIUCIJA

## 168. Paukščių takas

**Paukščių Takas – balzgana juosta nakties danguje, ypač gerai matoma tamsiomis, be Mėnulio, naktimis** (50 pav. (sp.)).

Šį pavadinimą švytinti dangaus juosta įgavo todėl, kad rudens vakarais driekiasi per visą dangų iš šiaurės rytų pietvakarių link, t. y. beveik sutampa su migruojančių paukščių išskridimo kryptimi.

150 m. vienas pirmųjų antikos astronomų ir matematikų K. Ptolemėjas iš Aleksandrijos geriausiai aprašė Paukščių Taką.

„Pieno Kelias, – rašė Ptolemėjas, – tai ne ratas, o zona, kuri visur balta kaip pienas; dėl to ji taip ir vadinama. Ši zona ne visur vienoda ir taisyklinga: kinta jos spalva, plotis, žvaigždžių skaičius ir jų išsidėstymas. Kai kur Pieno Kelias skaidosi į dvi atšakas – šiek tiek sutelkus dėmesį, tai lengva pastebėti.“

Dauguma tautų turi savo legendas apie Paukščių Taką ir įvairiai jį vadina. Tačiau jo prigimtis buvo nežinoma iki pat 1609–1610 m. žiemos, kai G. Galilėjus (1564–1642) pradėjo tirti jį pro savo gamybos teleskopą. Jis pamatė, kad Paukščių Taką sudaro nesuskaičiuojama daugybė žvaigždžių.

Anglų astronomas Viljamas Heršelis XVIII a. įrodė, kad **Paukščių Takas yra milžiniškos žvaigždžių sistemos – Galaktikos – projekcija dangaus sferoje.** Pirmasis teisingas šios žvaigždžių sistemos modelis buvo sukurtas tik XX a. pradžioje. Galaktiką sudaro šimtai milijardų žvaigždžių, jų spiečių, tarpžvaigždinių dujų ir dulkių debesų, vadinamų ūkais. Panašių tolimesnių galaktikų, išsidėsčiusių visomis kryptimis nuo jos, yra daugybė. Taigi mūsų Galaktika niekuo neišsiskiria Visatoje.

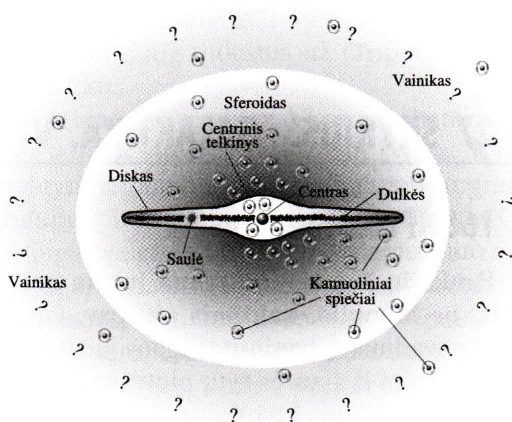
Saulė su savo planetomis skrieja apie Galaktikos centrą, esantį Šaulio žvaigždyno kryptimi ir nutolusį nuo mūsų per 28 000 šviesmečių. Galaktikos žvaigždės tankiausiai susispietusios disko formos erdvės dalyje, kurio skersmuo lygus maždaug 100 000 šviesmečių. Kadangi Saulė yra jo viduje, kitos tolimos disko žvaigždės susibūrusios į švytintį ratą – Paukščių Taką, dalijantį dangaus sferą į dvi maždaug lygias dalis. Kadangi žvaigždžių tankis nevienodas, o tarpžvaigždinėje erdvėje yra šviesą sugeriančių dulkelių debesų, todėl Paukščių Takas atrodo kaip labai netaisyklingų kontūrų šviesi juosta, vienur susiaurėjanti, kitur praplatėjanti arba suskylanti į kelias vagas.

Paukščių Takas yra siauriausias ir silpniausiai spindi žiemą ir pavasarį. Paukščio Tako dalis, kuri matoma vasarą ir rudenį, yra daug šviesesnė.

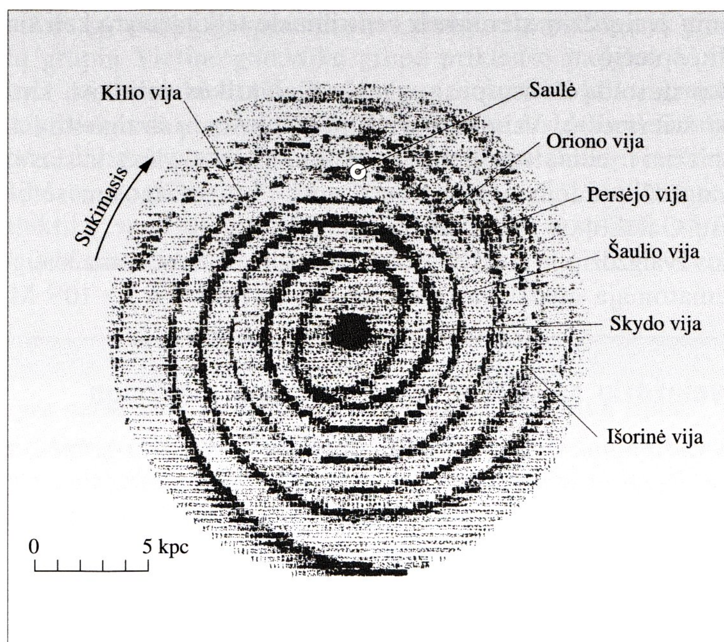
## 169. Galaktikos sandara

Galaktiką sudaro **dìskas**, kurį iš visų pusių supa mažesnio tankio **sferòidas**. Jo skersmuo daug didesnis už disko skersmenį. 367 paveiksle parodyta Galaktikos schema žiūrint iš disko briaunos.

Galaktikos disko spindulys – 50 000 šviesmečių, o sferoido – apie 80 000 šviesmečių. Sferoidas truputį suplotas – jo ašigalio spindulys lygus 0,8 disko plokštumoje esančio spindulio. Disko ir sferoido centrai sutampa. Disko žvaigždžių tankis didėja artėjant prie jo plokštumos, o sferoido žvaigždžių tankis – artėjant prie




367 pav.




368 pav.

Galaktiko scentro. Centro link storėja ir diskas. Tokiu būdu apie Galaktikos centrą susidaro **centrinis žvaigždžių telkinys**, kurio spindulys apie 8000 šviesmečių. Jame žvaigždės susispietusios kelis kartus tankiau negu apie Saulę. Jų orbitos yra ištęstos elipsės, įvairiais kampais pasvirusios į disko plokštumą. Mokslininkai mano, kad Galaktikos centre yra juodoji bedugnė, kurios masė apie $5 \cdot 10^6$ $M_\odot$. Ją supa kelių šviesmečių skersmens greitai besisukantis karštos plazmos verpetas.

Iš viso Galaktikoje yra 250 milijardų žvaigždžių, iš jų 90% diske, 5% sferoide ir 5% centriniame telkinyje. Galaktikos diske ir centriniame telkinyje yra dujų ir dulkių debesų, kurie sudaro maždaug 1/50 visų žvaigždžių masės.

Stebėjimais nustatyta, kad Galaktika sukasi, bet ne vienodu kampiniu greičiu, kaip kietasis kūnas, o kintamu – priklausomai nuo atstumo iki Galaktikos centro. Ties Saule Galaktikos sukimosi periodas lygus 225 milijonams metų. Tai vadinama *galãktiniais mẽtais*. Prieš vienerius galaktinius metus Žemė pergyveno *triãso* periodą, kai vieną vyraujančią gyvybės formą – amfibijas (varliagyvius) pakeitė kita – milžiniškos reptilijos (ropliai).

Mūsų Galaktika yra **spirãlinė sistemà**. Jos diske didelės masės karštos žvaigždės, supermilžinės ir dujų bei dulkių debesys išsidėstę spiralės formos vijomis. Mažesnės masės žvaigždės pasklidusios po visą diską. Spiralinė Galaktikos sandara pavaizduota 368 paveiksle. Skrituliuku pažymėta Saulė yra vadinamojoje *Oriòno vìjoje*.

Galaktikos sferoido žvaigždės irgi skrieja apie jo centrą, tačiau kiekviena atskirai, o jų orbitos labai ištęstos, elipsinės, sudarančios įvairiausius kampus su disko plokštuma.

Be pavienių žvaigždžių, sferoide ir centriniame telkinyje yra keli šimtai kamuolinių žvaigždžių spiečių.

Galaktikos sferoidą iš visų pusių gaubia **Galãktikos vainìkas**, kurio spindulys siekia 700 000 šviesmečių. Vainike beveik nėra pavienių žvaigždžių, tik negausūs kamuoliniai spiečiai ir nematomoji medžiaga (juodosios skylės), kurios trauka veikia Galaktikos žvaigždžių judėjimą. Šios nematomosios medžiagos masė bent 10 kartų didesnė už visų Galaktikos žvaigždžių bendrą masę.

Galaktikos žvaigždžių ir tarpžvaigždinės medžiagos masė – maždaug $2 \cdot 10^{11}$ $M_{\odot}$, o kartu su nematomąja medžiaga (juodosiomis skylėmis) – $2 \cdot 10^{12}$ $M_{\odot}$.

## 170. Žvaigždžių spiečiai ir tarpžvaigždinė medžiaga

**Spiẽčiais vadinamos vienodos kilmės erdvinės žvaigždžių grupės, susietos gravitacijos lauku.** Pagal erdvinį tankį spiečiai skirstomi į *padrikúosius* ir *kamuoliniùs*. Padrikuosius spiečius sudaro dešimtys ir šimtai, o kamuolinius – tūkstančiai ir šimtai tūkstančių žvaigždžių (žr. 51 pav. (sp.)).

Padrikųjų spiečių skersmuo – 10–50 šviesmečių eilės, o kamuolinių 3–4 kartus didesnis. Padrikųjų spiečių daugiausia yra Galaktikos diske, o kamuolinių – sferoide ir centriniame telkinyje. Padrikųjų spiečių žvaigždžių paviršiuje sunkiųjų elementų yra maždaug tiek, kiek Saulėje, o kamuolinių spiečių žvaigždžių paviršiuje – nuo 3 iki 150 kartų mažiau. Padrikųjų ir kamuolinių spiečių skriejimo apie Galaktikos centrą orbitos yra skirtingos.

Galaktikos disko plokštumoje telkiasi tarpžvaigždinė medžiaga, kurios 99% masės sudaro dujos, o 1% – dulkės. Tarpžvaigždinių dujų ir Saulės paviršiaus cheminė sudėtis labai panaši: apie 74% masės – vandenilis, 24% – helis, 2% – sunkesni elementai. Tarpžvaigždinės dulkės susideda iš metalų, jų oksidų, silicio junginių, grafito. Dulkės sugeria tolimesnių žvaigždžių šviesą, todėl dulkių debesys atrodo kaip tamsūs lopai žvaigždėto dangaus fone (52 pav. (sp.) ir 53 pav. (sp.)).

## 171. Galaktikų grupės ir spiečiai

Be mūsų Galaktikos, Visatoje yra daugybė panašių į ją žvaigždžių sistemų. Kadangi jos labai toli, tai atrodo kaip miglotos dėmelės, matomos tik pro žiūronus arba teleskopus. Plika akimi Lietuvoje matome tik vieną galaktiką – Andromedos ūką, arba M31. Dar dvi galaktikos – Didysis ir Mažasis Magelano Debesys – plika akimi matomos pietų pusrutulyje. Pagal išvaizdą galaktikos skirstomos į spiralines, elipsines, netaisyklingąsias ir pekuliarines. Artimiausios mūsų Galaktikai – tai Didžiojo ir Mažojo Magelano Debesų galaktikos (žr. 54 pav. (sp.)).

Be pavienių galaktikų, yra jų porų ir grupių. Apie 30 įvairaus dydžio ir įvairių tipų galaktikų, nutolusių nuo mūsų Galaktikos iki 6,5 mln. šviesmečių, sudaro vadinamąją **Víetinę galãktikų grùpę**. Jai priklauso trys spiralinės galaktikos (Galaktika, Andromedos M 31 bei Trikampio M 33) ir daug mažesnių elipsinių ir netaisyklingųjų galaktikų.

Už Vietinės galaktikų grupės ribų yra daugiau panašių į ją grupių. Kartu su daugybe kitų grupių Vietinė galaktikų grupė priklauso pailgam Skalikų galaktikų debesiui, kuris driekiasi Mergelės žvaigždyno link. **Galaktikų grupės, debesys ir pavienės galaktikos sudaro galaktikų spiečius, kurie susideda iš šimtų ir tūkstančių galaktikų**, pvz., 55 spalvotame paveiksle parodytas galaktikų spiečius Povo žvaigždyne. Vidutinė jų masė yra $10^{15}$ $M_{\odot}$, o skersmuo – 5–15 mln. šviesmečių. Artimiausias galaktikų spiečius yra Mergelės žvaigždyno kryptimi, už 60 mln. šviesmečių. Jame yra daugiau nei 2500 galaktikų.

## Klausimai ir užduotys

1. **Kas yra galaktika? Išvardykite pagrindinius galaktikų tipus.**
2. **Kuo ypatinga Andromedos galaktika?**
3. **Kurios galaktikos artimiausios mūsų Galaktikai?**
4. **Kas sudaro Vietinę galaktikų grupę?**

# 172. Visatos plėtimasis

1912–1925 m. JAV astronomas V. Slaiferis nustatė, kad daugelio galaktikų spektro linijos pasislinkusios į raudonąją spektro pusę. Tai rodo, kad jos tolsta nuo mūsų didžiuliu greičiu. 1929 m. kitas amerikietis E. Hablis apskaičiavo, kad galaktikų tolimo greitis $v$ yra tiesiog proporcingas nuotoliui $r$. Šį sąryšį nusako Hablio dėsnis:

$$r = \frac{v}{H}; \tag{324}$$

čia $H$ – Hablio konstanta, kuri rodo, kiek padidėja galaktikų tolimo greitis kas 1 milijonas parsekų, arba kas 3 261 600 šm. Dabar laikoma, kad $H$ = 75 km/s · Mpc, arba 23 km/s · mln. šm.

Kai galaktika tolsta ne didesniu kaip 50 000 km/s greičiu, jos greitis apskaičiuojamas iš spektro linijų poslinkio, taikant formulę

$$v = cz; \tag{325}$$

čia $c$, lygus 299 792,5 km/s, yra šviesos greitis tuštumoje, o $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$ – raudonasis poslinkis; $\lambda_0$ – spektro linijos tikrasis bangos ilgis, o $\Delta\lambda$ – linijos poslinkis. Kai galaktika tolsta greičiau negu 50 000 km/s, tuomet

$$v = c\frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1}. \tag{326}$$

Šioje formulėje atsižvelgta į reliatyvumo teorijos numatomą faktą, jog bet kurio kūno greitis negali būti didesnis už šviesos greitį.

1988 m. atrasta tolimiausia galaktika, kurios raudonasis poslinkis $z$ = 3,8, tolimo greitis sudaro beveik 92% šviesos greičio, nuotolis apie 12 mlrd. šm. Dar

didesniu greičiu skrieja kai kurie *kvazārai, tolimi Visatos objektai, jaunų ir labai stipriai spinduliuojančių galaktikų branduoliai*. Iki 1991 m. aptikto greičiausiai tolstančio kvazaro poslinkis $z = 4{,}9$, o tai atitinka 94,4% šviesos greičio.

Lengva apskaičiuoti, koks atstumas iki galaktikos, tolstančios šviesos greičiu $c$. Pagal Hablio dėsnį, $r = \frac{c}{H} \approx 4000$ Mpc $\approx$ 13 mlrd. šm.

Taigi Hablio dėsnis teigia, kad Visata plečiasi, dėl to nuotoliai tarp galaktikų visą laiką didėja. Jeigu visos galaktikos grįžtų tokiu pačiu greičiu atgal, tai po tam tikro laiko jos turėtų susitelkti vienoje vietoje. *Laikas nuo Visatos plėtimosi pradžios iki šių dienų vadinamas Visatos amžiumi.* Jei plėtimosi greitis per visą tą laiką nekito, tai Visatos amžius lygus atvirkštinei Hablio konstantos vertei:

$$T = \frac{I}{H}. \qquad (327)$$

Kai $H$ = 75 km/s · Mpc, tai $T$ = 13 mlrd. m. Jeigu Visatos plėtimosi greitis mažėja, tai tikrasis jos amžius yra mažesnis už atvirkštinę $H$ vertę. Remdamiesi įvairiausiais faktais ir hipotezėmis, astronomai padarė išvadą, kad iš pradžių Visatos masė užėmė mažą tūrį, o prieš 13 mlrd. metų įvyko didysis sprogimas, privertęs Visatą plėstis.

### Klausimai ir užduotys

**1. Ką teigia Hablio dėsnis?**
**2. Kokia Hablio konstantos fizikinė prasmė?**
**3. Kaip apskaičiuojamas Visatos amžius?**
**4. Apibūdinkite kvazarus.**
**5. Galaktikos raudonasis poslinkis $z$ = 0,13. Kokiu greičiu tolsta galaktika?**
**6. Kvazaro raudonasis poslinkis $z$ = 4,0. Kokiu greičiu tolsta kvazaras?**
**7. Koks būtų Visatos amžius, jei ji plėstųsi pastoviu greičiu, o Hablio konstanta būtų 50 km/s · Mpc, arba 100 km/s · Mpc?**

## 173. Visatos medžiagos ir galaktikų susidarymas

Prieš Didįjį sprogimą Visata buvo *singlètinės* (ypatingosios) būsenos ir be galo tanki. Per pirmąsias sekundes, praėjusias po sprogimo pradžios, susidarė visi dabar žinomi jėgų laukai: gravitacijos, elektromagnetinis, stiprusis ir silpnasis, taip pat elementariosios medžiagos dalelės ir elektromagnetinės spinduliuotės kvantai – fotonai. Pusę milijono metų Visata buvo tokia tanki ir karšta, kaip ištisinis neskaidrus ugnies kamuolys. Kai dėl plėtimosi jos medžiagos tankis sumažėjo, o temperatūra nukrito iki 3000 K, staiga pradėjo formuotis vandenilio ir helio atomų branduoliai. Visata praskaidrėjo ir medžiaga ėmė spinduliuoti į aplinką. Nuo to laiko išliko vadinamasis *liekamàsis spinduliãvimas 1 mm ilgio radijo bangų diapazone. Šis spinduliavimas ir galaktikų raudonasis poslinkis primena Visatos plėtimosi pradžią*.

Praėjus 250 mln. metų po sprogimo, dujų temperatūra nukrito iki 200 K. Tada dujos pradėjo telktis į $10^{11}$–$10^{13}$ $M_\odot$ masės progalaktinius gniužulus, sudarytus tik

iš vandenilio ir helio atomų. Iš šių gniužulų susiformavo pirmosios galaktikos. Vėliau progalaktikos suskilo į dar mažesnius gniužulus, iš kurių susidarė pirmosios žvaigždės ir jų spiečiai.

Iš pradžių progalaktiniai dujų gniužulai buvo maždaug sferinės formos. Iš jų susiformavo elipsinės galaktikos bei spiralinių galaktikų sferoidai. Tų progalaktikų, kurios pradėjo tvarkingai suktis apie savo ašį, dujinė medžiaga susiplojo ir sudarė sukimosi plokštumas – spiralinių galaktikų diskus. Progalaktikos, kurios lėtai sukosi apie savo ašį, liko elipsinėmis.

### Klausimai ir užduotys

**1. Kas žinoma apie singletinę būseną?**
**2. Kokie fizikiniai procesai prasidėjo po Didžiojo sprogimo?**

## 174. Gyvybė Visatoje

Jeigu gyvybė Žemėje susidarė iš neorganinės evoliucionuojančios medžiagos, tai yra tikimybė, kad Visatoje ji gali atsirasti ir kitur, jeigu tik ten susidarys palankios fizinės ir cheminės sąlygos. Jau daug metų bandoma nustatyti, kiek yra tokių Galaktikos planetų, kurių sąlygomis gali egzistuoti įvairių formų gyvybė, įskaitant ir civilizacijas, panašias į žemiškąją. Svarbiausios sąlygos gyvybei atsirasti yra šios: 1) žvaigždės cheminė sudėtis turi būti panaši į Saulės, nes organinės medžiagos nesusidarys, jeigu trūks sunkiųjų elementų, 2) svarbu, kad žvaigždė užimtų vietą pagrindinėje sekoje, nes tik čia ji išbūna ilgą laikotarpį (milijardus metų), reikalingą gyvybei atsirasti, 3) žvaigždė turi būti pakankamai sena (kelių milijardų metų), kad pakaktų laiko gyvybei susiformuoti, 4) šalia žvaigždės, vadinamoje gyvybės zonoje, kur yra nei per karšta, nei per šalta, turi būti planeta arba planetų, 5) planeta turi būti vidutinės masės (nuo 0,5 iki 2 Žemės masių), nes per didelė turės tik vandenilio ir helio atmosferą, o per maža – per daug retą atmosferą, 6) planetos orbita aplink centrinę žvaigždę turi būti artima apskritimui, nes priešingu atveju temperatūra planetos paviršiuje labai kaitaliosis. Šių sąlygų neturi sferoido žvaigždės, kuriose per maža anglies, azoto ir deguonies, ir dvinarės žvaigždės, šalia kurių negali egzistuoti planetos, skriejančios apskritomis orbitomis.

Pagal mokslinius skaičiavimus, jei Galaktikos diske yra 250 mlrd. žvaigždžių, tai gyvenamų planetų jame galėtų būti nuo 25 mln. iki 0,25 mln. Nebūtinai kiekvienoje šių planetų per 4 mlrd. metų atsiras protingos būtybės: gyvybės raida gali sustoti moliuskų, žuvų arba roplių stadijoje. Tačiau dauguma tyrinėtojų linkę manyti, kad Galaktikoje yra nuo 100 000 iki 10 mln. civilizacijų. Pirmuoju atveju artimiausia Žemei civilizacija turi būti maždaug už 500 šm, o antruoju atveju – už 100 šm.

Jeigu taip yra iš tikrųjų, tai daugelis šių civilizacijų turėtų būti senesnės už žemiškąją milijonais ir net milijardais metų. Mat Žemėje žmonės, galime sakyti, „ką tik“ atsirado: 1 mln. metų, palyginti su keliais milijardais, yra tik akimirka. Kad būtų lengviau įsivaizduoti, visą Žemės gyvavimo amžių, t. y. 4,5 mlrd. metų, palyginkime jį su vienais metais. Tuomet pirmieji mikroorganizmai pasirodė tik kovo pabai-

goje, žuvys – lapkričio gale, ropliai – gruodžio viduryje, žinduoliai – gruodžio 27 d. vidurnakty, pirmykščiai žmonės – gruodžio 31 d. 20 h, dabartinėje Lietuvos teritorijoje pirmieji žmonės apsigyveno prieš 1,5 min, senovės Egipto valstybė susikūrė prieš 40–50 s, o nuo pirmojo dirbtinio Žemės palydovo paleidimo praėjo tik 0,2 s. Taigi mūsų civilizacija kosminiu požiūriu yra visai jauna, ką tik gimusi. Tačiau jau spėjome ištirti kosminę erdvę aplink Žemę, apsilankyti Mėnulyje, pasiųsti erdvėlaivius į kitas planetas ir planuojame tarpplanetinius bei tapžvaigždinius skrydžius. Įsivaizduokite, kokias fantastiškas mokslo ir technikos aukštumas turėjo pasiekti civilizacijos, atsiradusios Galaktikoje prieš milijonus ir net milijardus metų! Manoma, kad iš vienos vietos civilizacija gali išplisti po visą Galaktiką per 1 mln. metų. Taigi per milijonus arba milijardus metų Galaktikoje jau galėjo susidaryti daug galingų supercivilizacijų.

Iki šiol lieka mįslė, kodėl tų civilizacijų atstovai nesilanko Žemėje. O gal jie atvyksta, bet vengia su mumis bendrauti ir todėl jų nepastebime? Galbūt Žemės civilizacija dar nepakankamai aukšta, kad būtų priimta į Galaktikos civilizacijų sandraugą?

Kai kas mano, kad Žemė yra nuolat lankoma ateivių iš kosminės erdvės. Tai esą neatpažinti skraidantys objektai ir jų pilotai – ufonautai. Deja, iki šiol tai nepagrįsta pakankamai griežtais moksliniais įrodymais.

Jeigu aukštos civilizacijos transliuoja radijo ar televizijos laidas arba siunčia signalinius radijo impulsus, juos turėtų aptikti radioteleskopai. Sukurta pasaulinė radijo signalų paieškų programa SETI (*Search of Extraterrestrial Inteligence* – Nežemiškų civilizacijų paieška), kurioje dalyvauja daugelio šalių astronomai. Deja, iki šiol nepavyko aptikti jokio radijo signalo, kurį būtų galima laikyti dirbtiniu. Tačiau tai dar nereiškia, kad tokių radijo transliacijų nėra: mes nežinome nei bangų, kuriomis signalai siunčiami, ilgio, nei krypties, iš kur jie gali sklisti. Galbūt jokių radijo signalų niekada ir nebus aptikta, nes aukštos civilizacijos gali naudoti visai kitus, mums dar nežinomus ryšio kanalus.

Civilizacijos gali būti pastebėtos Galaktikoje ir kitu būdu, pavyzdžiui, aptikus vadinamuosius „kosminius stebuklus" – reiškinius, kurie negali vykti gamtinėmis sąlygomis, bet gali būti dirbtinės kilmės. Sunkiausia yra ne pastebėti tokį reiškinį, bet atskirti jį nuo gamtinių. Tik tada, kai neįmanoma tokių reiškinių paaiškinti jokiomis natūraliomis priežastimis, galima galvoti apie dirbtinę jų kilmę. Tarp tokių „įtartinų" objektų yra šios žvaigždės: infraraudonosios, anomalios cheminės sudėties ir tos, kurių padėčių Harcšprungo ir Raselo diagramoje negalima paaiškinti žinomais evoliucijos dėsniais.

## Klausimai ir užduotys

1. **Išvardykite sąlygas, reikalingas gyvybei atsirasti.**
2. **Kuriose žvaigždėse negali egzistuoti gyvybė? Atsakymą pagrįskite.**
3. **Kiek apytiksliai žvaigždžių yra Galaktikos diske?**
4. **Koks yra Žemės amžius?**
5. **Ar yra žinoma kitų žvaigždžių planetinių sistemų?**
6. **Ką vadiname civilizacija?**

# 175. Antropinis principas

Visatos objektų – galaktikų, žvaigždžių, planetų, tarpžvaigždinių dujų ir dulkių – susidarymas ir evoliucija aiškinami teoriniais modeliais ir matematiniais apskaičiavimais, o šie remiasi fizikos ir chemijos dėsniais, kurie galioja pačiose toliausiose stebimos Visatos srityse, nutolusiose nuo mūsų per 13 mlrd. šviesmečių. Astronomija ir kosmologija paaiškina, kaip susidarė elementariosios dalelės, atomai, cheminiai elementai ir visa dabartinė Visatos struktūra. Visatos evoliucija dera su geologų aprašoma Žemės bei jos atmosferos ir biologų pateikiama gyvybės evoliucija.

Tačiau atrodo, kad Visatoje viskas vyksta automatiškai pagal kažkokią programą. Fizinės sąlygos nuo pat Visatos susiformavimo ypač tiko gyvybei atsirasti ir protingoms būtybėms išsivystyti. Mokslininkai šį faktą vadina *antròpiniu prìñcipu*. Tarp Visatos ir mikropasaulio konstantų yra aiškus ryšys, jos kažkaip suderintos. Be to, pačios konstantos sudaro palankiausias sąlygas medžiagai, galaktikoms, žvaigždėms, planetoms, gyvybei ir protingoms būtybėms atsirasti, egzistuoti ir evoliucionuoti. Kitaip tariant, Visata tarsi pritaikyta stebėtojui – žmogui – atsirasti ir egzistuoti.

Pateikiama įvairių nuomonių, kodėl taip yra. Vieni linkę manyti, kad visa tai sutvarkė antgamtinė jėga arba antgamtinis protas. Kiti šį vaidmenį skiria labai aukšto lygio galingai supercivilizacijai, sugalvojusiai kosminio masto fizikinį eksperimentą. Dar kiti antropinį principą laiko kryptinga progresyvia raida, kuri pagrįsta tiesiog materijos savybe. Su atropiniu principu susijusi ir kita žmoniją kankinanti filosofinė problema – koks gi yra Visatos ir žmonijos egzistavimo tikslas.

## Klausimai ir užduotys

1. **Ar žinomos nežemiškos civilizacijos?**
2. **Kaip suprantame antropinį principą?**

# KLAUSIMŲ IR UŽDUOČIŲ ATSAKYMAI

## 17 skyrius

**113.** **3.** 2,4 lx. **4.** 0,05 lm. **5.** ≈ 0,3 m. **7.** 500 cd. **8.** 18,2 lm. **9.** 17,5 m. **10.** 12,56 lm/W; 10,21 lm/W. **11.** ≈ 47 lx.

## 18 skyrius

**114.** **4.** 0,8 m. **5.** 50 m. **6.** 1,5 m.
**115.** **8.** 24°; 66°. **9.** 81°.
**116.** **2.** 110°; 55°. **3.** 30°. **4.** 2 m. **5.** 24 cm. **6.** 0,37 m atstumu nuo veidrodžio.
**117.** **7.** ≈ 2. **8.** ≈ 18°; ≈ 60°; 45°; ≈ 32°; 32°. **9.** 56°; 34°. **10.** ≈ 1,3. **11.** 48°.
**118.** **4.** 35°; bus visiškasis šviesos atspindys. **5.** ≈ 42°. **6.** Išeis; neišeis.
**119.** **1.** 6,6 cm. **2.** ≈ 27°; 23°; 21,6°. **3.** 1,071. **4.** 18°20´.
**121.** **3.** 4,8 D. **4.** 0,39 m. **5.** 3. **6.** 29. **7.** 0,8 m; 0,6 m. **8.** 360 m. **9.** 0,154 m. **10.** 0,2 m.
**122.** **2.** 0,045 rad. **3.** Iš 830 m. **4.** ≈ 63 m. **5.** ≈ 60 m. **8.** ≈ 1 mm. **9.** –1 D. **10.** 12,5 cm. **11.** 2,75 D.

## 19 skyrius

**123.** **6.** max; min; max. **7.** Apšviestas. **8.** 160 μm.
**124.** **3.** ≈ $5{,}8 \cdot 10^{-3}$ rad. **4.** ≈ 0,5 m. **5.** 0,873 μm. **6.** 20°. **7.** Juosta platės.

## 20 skyrius

**127.** **6.** 1275 nm. **7.** ≈ 5300K. **8.** ≈ nm; ≈ $4{,}6 \cdot 10^{10}$ J/m$^2$ · s. **9.** 9,3 μm.

## 21 skyrius

**133.** **1.** 410 nm, tai – ultravioletiniai spinduliai. **2.** 2,9 kW.
**134.** **5.** 700 km/s. **6.** 1,7 V. **7.** Penkis kartus padidės. **8.** ≈ 0,25 Å. **9.** 1,2 kV. **10.** 1,5. **11.** 1,47. **12.** $7{,}2 \cdot 10^{-19}$ J; $9{,}1 \cdot 10^{5}$ m/s; $3{,}8 \cdot 10^{-19}$J. **13.** Neįvyks.
**135.** **4.** ≈ $6{,}6 \cdot 10^{-11}$ Pa. **5.** ≈ 6,7 μPa. **6.** ≈ $2{,}9 \cdot 10^{21}$.

## 22 skyrius

**137.** **1.** $-3{,}9 \cdot 10^{-18}$ C. **2.** Aliuminis. **8.** $3{,}1 \cdot 10^{-14}$ m. **9.** ≈ $6{,}8 \cdot 10^{-14}$ m.
**138.** **1.** $6{,}058 \cdot 10^{-7}$ m. **2.** $2{,}8 \cdot 10^{3}$.
**140.** **3.** $3{,}14 \cdot 10^{15}$ Hz. **4.** ≈ $3{,}02 \cdot 10^{-19}$ J. **5.** 25 kartus padidėja; 25 kartus sumažėja. **6.** 2. **7.** 9 kartus padidėja; 4 kartus sumažėja. **8.** ≈ $5{,}4 \cdot 10^{11}$ V/m; ≈ 27,2 V.

## 23 skyrius

**148.** **1.** 0,13701 amV; $E_2$ = 127,5 MeV. **2.** 16,8 MeV; 0,689 MeV. **3.** $8{,}2 \cdot 10^{10}$ J; $2{,}8 \cdot 10^{3}$ kg.

## 25 skyrius

**160.** **7.** 672 paros.

## 27 skyrius

**172.** **5.** 39 000 km/s. **6.** 277 000 km/s. **7.** 20 mlrd. metų arba 10 mlrd. metų.

# PRIEDAI

## Pirmojo fizikos koncentro pagrindinės sąvokos

| Fizikinis dydis | Formulė | Matavimo vienetas |
|---|---|---|
| Kelias | $s = vt$ | 1 m |
| Greitis | $v = \frac{s}{t}$ | 1 m/s |
| Pagreitis | $a = \frac{v - v_0}{t}$ <br> $a = \frac{F}{m}$ | 1 $m/s^2$ |
| Medžiagos tankis | $\rho = \frac{m}{V}$ | 1 $kg/m^3$ |
| Jėga | $F = ma$ | 1 N |
| Sunkio jėga | $F = mg$ | |
| Kūno svoris | $P = mg$ | |
| Mechaninis darbas | $A = Fs$ | 1 J |
| Mechaninė galia | $N = \frac{A}{t}$ | 1 W = 1 J/s |
| Potencinė energija | $E_p = mgh$ | 1 J |
| Kinetinė energija | $E_k = \frac{mv^2}{2}$ | 1 J |
| Jėgos momentas | $M = Fl$ | 1 Nm |
| Naudingumo koeficientas | $\eta = \frac{A_n}{A_v} = \frac{A_n}{Q}$ | |
| Slėgis | $p = \frac{F}{S}$ | 1 Pa = 1 $N/m^2$ |
| Skysčių (dujų) slėgis | $p = \rho gh$ | 1 Pa |
| Archimedo jėga | $F_A = \rho_s gV$ | 1 N |
| Šilumos kiekis | $Q = cm(t_2 - t_1)$ | 1 J |
| Šilumos kiekis, išsiskiriantis kurui sudegus | $Q = qm$ | 1 J |
| Šilumos kiekis kūnui išlydyti (sukietėti) | $Q = \lambda m$ | 1 J |
| Šilumos kiekis kūnui išgarinti (kondensuotis) | $Q = Lm$ | 1 J |
| Elektros srovės stipris | $I = \frac{q}{t}$ | 1 A |
| Elektrinė įtampa | $U = \frac{A}{q}$ | 1 V |
| Laidininko elektrinė varža | $R = \rho \frac{l}{S}$ | 1 Ω |
| Elektros srovės darbas | $A = UIt$ | 1 J = 1 Ws |
| Elektros srovės galia | $P = UI$ | 1 W = 1 J/s |

*Tęsinys*

| Fizikinis dydis | Formulė | Matavimo vienetas |
|---|---|---|
| Periodas | $T = \frac{t}{n}$ | 1 s |
| Dažnis | $\nu = \frac{1}{T}$ | 1 Hz = 1 $s^{-1}$ |
| Bangos sklidimo greitis | $v = \frac{\lambda}{T};\ v = \lambda\nu$ | 1 m/s |
| Bangos ilgis | $\lambda = \frac{v}{\nu};\ \lambda = vT$ | 1 m |
| Elektrinė talpa | $C = \frac{q}{U}$ | $1\ \text{F} = \frac{1\ \text{C}}{1\ \text{V}}$ |
| Tomsono formulė | $T = 2\pi\sqrt{LC}$ | 1 s |
| Apšvieta | $E = \frac{\Phi}{S};\ E = \frac{I}{R^2}$ | 1 lx = 1 lm/1m |
| Medžiagos lūžio rodiklis | $n = \frac{C}{V}$ | |
| Lęšio formulė | $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ | |
| Optinė geba | $D = \frac{1}{F}$ | 1 D = 1 $m^{-1}$ |
| Tiesinis didinimas | $\Gamma = \frac{f}{d}$ | |
| Difrakcinės gardelės formulė | $d \sin \varphi = k\lambda$ | |
| Fotono energija | $E = h\nu;\ E = h\frac{c}{\lambda}$ | 1 J |
| Einšteino fotoefekto lygis | $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$ | |

## Pagrindinės konstantos

| | | |
|---|---|---|
| Elementarusis elektros krūvis (elektrono krūvio modulis) | $e$ | $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C |
| Elektrono rimties masė | $m_e$ | $9{,}1095 \cdot 10^{-31}$ kg = 0,000548 mav |
| Protono rimties masė | $m_p$ | $1{,}6726 \cdot 10^{-27}$ kg = 1,00728 mav |
| Neutrono rimties masė | $m_n$ | $1{,}6749 \cdot 10^{-27}$ kg = 1,00866 mav |
| Šviesos greitis vakuume | $c$ | $2{,}9979 \cdot 10^{8}$ m/s |
| Garso greitis ore (0 °C) | $v_g$ | 331 m/s |
| Gravitacijos konstanta | $G$ | $6{,}672 \cdot 10^{-11}$ N · $m^2/kg^2$ |
| Laisvojo kritimo pagreitis | $g$ | 9,81 $m/s^2$ |
| Normalus atmosferos slėgis | $p_0$ | $1{,}01 \cdot 10^{5}$ Pa |
| Kulono dėsnio konstanta | $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ | $9 \cdot 10^{9}$ N · $m^2/C^2$ |

| | | |
|---|---|---|
| Elektrinė konstanta | $\varepsilon_0$ | $8{,}854 \cdot 10^{-12}$ F/m |
| Magnetinė konstanta | $\mu_0$ | $1{,}257 \cdot 10^{-6}$ H/m |
| Planko konstanta | $h$ | $6{,}626 \cdot 10^{-34}$J · s = $4{,}136 \cdot 10^{-15}$ eV · s |
| | $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ | $1{,}0546 \cdot 10^{-34}$J · s = $6{,}586 \cdot 10^{-16}$ eV · s |
| Avogadro skaičius | $N_A$ | $6{,}022 \cdot 10^{23}$ $mol^{-1}$ |
| Bolcmano konstanta | $k$ | $1{,}3807 \cdot 10^{-23}$J/K = $8{,}617 \cdot 10^{-4}$ eV/K |
| Rydbergo konstanta | $R$ | $3{,}28 \cdot 10^{15}$ Hz |
| | | $1{,}1 \cdot 10^{7}$ $m^{-1}$ |
| Saulės konstanta | $J_C$ | 1370 J/($m^2$ · s) |
| Vyno konstanta | $b$ | $29 \cdot 10^{-4}$ mK |

## Pagrindinių konstantų išvestiniai dydžiai

| | | |
|---|---|---|
| Rimties energija | $E_0 = mc^2$ | |
| elektrono | | $8{,}187 \cdot 10^{-14}$ J = 0,511 MeV |
| protono | | $1{,}503 \cdot 10^{-10}$ J = 938,26 MeV |
| neutrono | | $1{,}505 \cdot 10^{-10}$ J = 939,55 MeV |
| Masės ir energijos sąryšio koeficientas | $c^2 = \frac{E}{m}$ | $8{,}9874 \cdot 10^{16}$ J/kg = 931,5 MeV/u |
| Elektrono krūvio ir masės santykis | $\frac{\lvert e \rvert}{m_e}$ | $1{,}759 \cdot 10^{11}$ C/kg |
| Faradėjaus skaičius | $F = \lvert e \rvert N_A$ | $9{,}648 \cdot 10^{4}$ C/mol |
| Universalioji dujų konstanta | $R = kN_A$ | 8,314 J/(mol · K) |

## Kai kurių matavimo vienetų sąryšis

| | |
|---|---|
| Angstremas | 1 $^0A$ = $10^{-10}$ m |
| Masės atominis vienetas | 1 u = 1 mav = $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ kg |
| Fizikinė atmosfera | 1 atm = $1{,}01 \cdot 10^{5}$ Pa |
| Gyvsidabrio stulpelio milimetras | 1 mmHg = 133 Pa |
| Elektronvoltas | 1 eV = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J |
| Kalorija | 1 cal = 4,19 J |
| Arklio galia | 1 AG = 735,5 W |
| Astronominis vienetas | 1 AU ≈ $150 \cdot 10^{9}$ m |
| Šviesmetis | 1 ly ≈ $9{,}5 \cdot 10^{15}$ m |

## Žinios apie Saulę, Žemę ir Mėnulį

| | |
|---|---|
| Saulės spindulys, m | $6{,}96 \cdot 10^{8}$ |
| Saulės masė, kg | $1{,}99 \cdot 10^{30}$ |
| Vidutinis Žemės spindulys, m | $6{,}371 \cdot 10^{6}$ |
| Žemės masė, kg | $5{,}976 \cdot 10^{24}$ |
| Žemės apsisukimo apie savo ašį periodas | 23 h 56 min |
| Laisvojo kritimo pagreitis (Paryžiaus platumoje, jūros lygyje), m/s$^2$ | 9,80665 |
| Normalus atmosferos slėgis, Pa | 101325 |
| Oro molio masė, kg/mol | $29 \cdot 10^{-3}$ |
| Vidutinis nuotolis nuo Žemės iki Saulės, m | $1{,}496 \cdot 10^{11}$ |
| Mėnulio spindulys, m | $1{,}737 \cdot 10^{6}$ |
| Mėnulio masė, kg | $7{,}35 \cdot 10^{22}$ |
| Mėnulio apsisukimo aplink Žemę periodas | 27 paros |
| Laisvojo kritimo pagreitis Mėnulio paviršiuje, m/s$^2$ | 1,623 |
| Vidutinis nuotolis nuo Žemės iki Mėnulio, m | $3{,}844 \cdot 10^{8}$ |

## Kartotinių ir dalinių vienetų priešdėliai

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| eksa- | E | $10^{18}$ | deci- | d | $10^{-1}$ |
| peta- | P | $10^{15}$ | centi- | c | $10^{-2}$ |
| tera- | T | $10^{12}$ | mili- | m | $10^{-3}$ |
| giga- | G | $10^{9}$ | mikro- | μ | $10^{-6}$ |
| mega- | M | $10^{6}$ | nano- | n | $10^{-9}$ |
| kilo- | k | $10^{3}$ | piko- | p | $10^{-12}$ |
| hekto- | h | $10^{2}$ | femto- | f | $10^{-15}$ |
| deka- | da | $10^{1}$ | ato- | a | $10^{-18}$ |

## Graikų abėcėlė

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Α α | alfa | Ι ι | jota | Ρ ρ | ro |
| Β β | beta | Κ ℵ | kapa | Σ σ | sigma |
| Γ γ | gama | Λ λ | lambda | Τ τ | tau |
| Δ δ | delta | Μ μ | mi | ϒ υ | ypsilon |
| Ε ε | epsilon | Ν ν | ni | Φ φ | fi |
| Ζ ξ | dzeta | Ξ ζ | ksi | Χ χ | chi |
| Η η | eta | Ο ο | omikron | Ψ ψ | psi |
| Θ ϑ | teta | Π π | pi | Ω ω | omega |

# Pagrindinių fizikinių dydžių lentelės

## I. Kai kurių medžiagų tankis

| Medžiaga | ρ, × 10³ kg/m³ | Medžiaga | ρ, × 10³ kg/m³ |
|---|---|---|---|
| Kietosios medžiagos, kai temperatūra 20 °C | | | |
| Akmens anglys | 1,4 | Nichromas | 8,3 |
| Alavas | 7,3 | Nikelinas | 8,8 |
| Aliuminis | 2,7 | Nikelis | 8,9 |
| Auksas | 19,3 | Parafinas | 0,9 |
| Cinkas | 7,1 | Platina | 21,5 |
| Chromas | 7,2 | Plyta | 1,8 |
| Deimantas | 3,5 | Porcelianas | 2,3 |
| Ebonitas | 1,2 | Sidabras | 10,5 |
| Geležis, plienas | 7,8 | Sniegas | 0,3 |
| Germanis | 2,1 | Stiklas (langų) | 2,5 |
| Gintaras | 1,1 | Švinas | 11,4 |
| Grafitas | 5,32 | Uranas | 18,7 |
| Kamštis | 0,24 | Valgomoji druska | 2,1 |
| Ketus | 7,4 | Vario sulfatas | 2,2 |
| Konstantanas | 8,9 | Varis | 8,9 |
| Ledas (0 °C) | 0,9 | Volframas | 19,3 |
| Malkos (pušinės) | 0,5 | Žalvaris | 8,5 |
| Manganinas | 8,5 | Žėrutis | 2,8 |
| Skysčiai, kai temperatūra 20 °C | | | |
| Aliejus | 0,91 | Gyvsidabris (0 °C) | 13,6 |
| Alyva (mineralinė, transformatorinė) | 0,92 | Glicerinas | 1,26 |
| | | Nafta | 0,8 |
| Alyvų aliejus | 0,92 | Terpentinas | 0,87 |
| Etilo alkoholis | 0,79 | Vanduo | 1,0 |
| Etilo eteris | 0,71 | Vario sulfatas (sotusis) | 1,15 |
| Benzinas | 0,7 | Žibalas | 0,8 |
| Dujos (normaliomis sąlygomis) | | | |
| Argonas | $1{,}78 \cdot 10^{-3}$ | Kseonas | $5{,}85 \cdot 10^{-3}$ |
| Azotas | $1{,}25 \cdot 10^{-3}$ | Metanas | $0{,}72 \cdot 10^{-3}$ |
| Chloras | $3{,}21 \cdot 10^{-3}$ | Neonas | $0{,}90 \cdot 10^{-3}$ |
| Deguonis | $1{,}43 \cdot 10^{-3}$ | Oras | $1{,}29 \cdot 10^{-3}$ |
| Helis | $0{,}18 \cdot 10^{-3}$ | Švytinčiosios dujos | $0{,}73 \cdot 10^{-3}$ |
| Kriptonas | $3{,}74 \cdot 10^{-3}$ | Vandenilis | $0{,}09 \cdot 10^{-3}$ |

## II. Kai kurių medžiagų savitoji šiluma

| Medžiaga | $c$, $\times 10^3$ J/(kg · K) | Medžiaga | $c$, $\times 10^3$ J/(kg · K) |
|---|---|---|---|
| Kietosios medžiagos | | | |
| Alavas | 0,233 | Parafinas | 3,2 |
| Aliuminis | 0,92 | Plienas, geležis | 0,46 |
| Auksas | 0,125 | Plyta | 0,75 |
| Cinkas | 0,38 | Sidabras | 0,25 |
| Ketus (pilkasis) | 0,55 | Stiklas | 0,84 |
| Ledas | 2,09 | Švinas | 0,13 |
| Medis | 2,7 | Varis | 0,38 |
| Naftalinas | 1,3 | Žalvaris | 0,38 |
| Skysčiai | | | |
| Alyva (mineralinė) | 2,1 | Glicerinas | 2,43 |
| Etilo alkoholis | 2,43 | Transformatorinė alyva | 2,093 |
| Geležis (skysta) | 0,83 | Vanduo | 4,2 |
| Gyvsidabris | 0,125 | Žibalas | 2,14 |
| Dujos (kai slėgis pastovus) | | | |
| Amoniakas | 2,1 | Helis | 5,2 |
| Anglies dioksidas | 0,83 | Oras | 1,0 |
| Azotas | 1,0 | Vandenilis | 14,3 |
| Deguonis | 0,92 | Vandens garai | 2,2 |

## III. Kai kurių rūšių kuro degimo šiluma

| Medžiaga | $q$, MJ/kg | Medžiaga | $q$, MJ/kg |
|---|---|---|---|
| Kietasis kuras | | | |
| Akmens anglys | | Koksas | 30,3 |
| markės A–I | 20,5 | Malkos (sausos) | 8,3 |
| markės A–II | 30,3 | Medžio anglys | 29,7 |
| Durpės | 15 | Parakas | 3,0 |
| Skystasis kuras | | | |
| Benzinas | 46 | Mazutas | 40 |
| Dyzelinis kuras | 42 | Nafta | 43 |
| Etilo alkoholis | 27 | Žibalas | 43,1 |
| Dujinis kuras (1 $m^3$ normaliomis sąlygomis) | | | |
| Gamtinės dujos | 35,5 | Koksavimo dujos | 16,4 |
| Generatorinės dujos | 5,5 | Švytinčiosios dujos | 21 |

## IV. Kai kurių medžiagų virimo taškas ir savitoji garavimo šiluma

| Medžiaga | $t_{vir}$, °C (kai slėgis normalus) | $L$, MJ/kg |
|---|---|---|
| Acetonas | 56,2 | 0,52 |
| Amoniakas | –33,4 | 1,37 |
| Benzinas | 150 | 0,3 |
| Etilo alkoholis | 78 | 0,857 |
| Etilo eteris | 35 | 0,352 |
| Geležis (skysta) | 3050 | 0,06 |
| Gyvsidabris | 357 | 0,29 |
| Oras | –192 | 0,21 |
| Vanduo | 100 | 2,26 |
| Vanduo (sunkusis) | 101,43 | 2,06 |

## V. Kai kurių medžiagų lydymosi temperatūra ir savitoji lydymosi šiluma

| Medžiaga | $t_{lyd}$, °C | $\lambda$, kJ/kg |
|---|---|---|
| Alavas | 232 | 58 |
| Aliuminis | 659 | 380 |
| Auksas | 1064 | 66 |
| Geležis | 1530 | 270 |
| Ketus (pilkasis) | 1150 | 97 |
| Ledas | 0 | 335 |
| Naftalinas | 80 | 151 |
| Plienas | 1400 | 210 |
| Sidabras | 960 | 88 |
| Švinas | 327 | 25 |
| Varis | 1083 | 180 |
| Volframas | 3410 | 26 |

## VI. Kai kurių skysčių paviršiaus įtempimo koeficientas, kai temperatūra 20 °C

| Skystis | $\sigma$, × $10^{-2}$ N/m | Skystis | $\sigma$, × $10^{-2}$ N/m |
|---|---|---|---|
| Acetonas | 2,4 | Nafta | 3,0 |
| Benzinas | 2,9 | Plienas | 4,6 |
| Etilo alkoholis | 2,2 | Terpentinas | 2,7 |
| Gyvsidabris | 47,0 | Vanduo | 7,2 |
| Glicerinas | 5,9 | Vario sulfatas | 7,4 |
| Muilo tirpalas | 4,0 | Žibalas | 2,4 |

## VII. Kai kurių medžiagų tempimo stiprumo riba $\sigma_{st}$ ir tamprumo modulis $E$

| Medžiaga | $\sigma_{st}$, MPa | $E$, GPa |
|---|---|---|
| Alavas | 20 | 50 |
| Aliuminis | 100 | 70 |
| Betonas | | 20 |
| Ketus | | 90 |
| Medis | | 10 |
| Plienas | 500 | 200 |
| Plyta | | 28 |
| Sidabras | 140 | 80 |
| Švinas | 15 | 15 |
| Varis | 400 | 120 |
| Žalvaris | | 110 |

## VIII. Sočiųjų vandens garų tankis ir slėgis įvairiose temperatūrose

| $t$, °C | $\rho$, $\times 10^{-3}$ kg/m$^3$ | $p$, mm Hg | $p$, $\times 10^3$ Pa | $t$, °C | $\rho$, $\times 10^{-3}$ kg/m$^3$ | $p$, mm Hg | $p$, $\times 10^3$ Pa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| –10 | 2,14 | 1,95 | 0,26 | 2 | 5,6 | 5,3 | 0,71 |
| –5 | 3,24 | 3,01 | 0,40 | 3 | 6,0 | 5,7 | 0,76 |
| –4 | 3,51 | 3,28 | 0,44 | 4 | 6,4 | 6,1 | 0,81 |
| –3 | 3,81 | 3,57 | 0,48 | 5 | 6,8 | 6,6 | 0,88 |
| –2 | 4,13 | 3,88 | 0,52 | 6 | 7,3 | 7,0 | 0,93 |
| –1 | 4,47 | 4,22 | 0,56 | 7 | 7,8 | 7,5 | 1,0 |
| 0 | 4,8 | 4,6 | 0,61 | 8 | 8,3 | 8,0 | 1,07 |
| 1 | 5,2 | 4,9 | 0,65 | 9 | 8,8 | 8,6 | 1,15 |
| 10 | 9,4 | 9,2 | 1,23 | 25 | 23,0 | 23,8 | 3,17 |
| 11 | 10,0 | 9,8 | 1,31 | 26 | 24,4 | 25,2 | 3,36 |
| 12 | 10,7 | 10,5 | 1,40 | 27 | 25,8 | 26,7 | 3,56 |
| 13 | 11,4 | 11,2 | 1,49 | 28 | 27,2 | 28,4 | 3,79 |
| 14 | 12,1 | 12,0 | 1,60 | 29 | 28,7 | 30,0 | 4,00 |
| 15 | 12,8 | 12,8 | 1,71 | 30 | 30,3 | 31,8 | 4,24 |
| 16 | 13,6 | 13,6 | 1,81 | 40 | 51,2 | 55,3 | 7,37 |
| 17 | 14,5 | 14,5 | 1,93 | 50 | 83,0 | 92,5 | 12,33 |
| 18 | 15,4 | 15,5 | 2,07 | 60 | 130,0 | 149,4 | 19,92 |
| 19 | 16,3 | 16,5 | 2,20 | 80 | 293,0 | 355,1 | 47,33 |
| 20 | 17,3 | 17,5 | 2,33 | 100 | 598,0 | 760,0 | 101,31 |
| 21 | 18,3 | 18,7 | 2,49 | 120 | 1123,0 | 1489,0 | 198,48 |
| 22 | 19,4 | 19,8 | 2,64 | 160 | 3259,0 | 4636,0 | 617,98 |
| 23 | 20,6 | 21,1 | 2,81 | 200 | 7763,0 | 11661,0 | 15544,41 |
| 24 | 21,8 | 22,4 | 2,99 | | | | |

## IX. Psichrometrinė lentelė

| Sausojo termometro rodmenys, °C | Sausojo ir drėgnojo termometro rodmenų skirtumas, °C | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| | Santykinė drėgmė, % | | | | | | | | | | | |
| 0 | 100 | 82 | 63 | 45 | 28 | 11 | | | | | | |
| 1 | 100 | 83 | 65 | 48 | 32 | 16 | | | | | | |
| 2 | 100 | 84 | 68 | 51 | 35 | 20 | | | | | | |
| 3 | 100 | 84 | 69 | 54 | 39 | 24 | 10 | | | | | |
| 4 | 100 | 85 | 70 | 56 | 42 | 28 | 14 | | | | | |
| 5 | 100 | 86 | 72 | 58 | 45 | 32 | 19 | 6 | | | | |
| 6 | 100 | 86 | 73 | 60 | 47 | 35 | 23 | 10 | | | | |
| 7 | 100 | 87 | 74 | 61 | 49 | 37 | 26 | 14 | | | | |
| 8 | 100 | 87 | 75 | 63 | 51 | 40 | 28 | 18 | 7 | | | |
| 9 | 100 | 88 | 76 | 64 | 53 | 42 | 31 | 21 | 11 | | | |
| 10 | 100 | 88 | 76 | 65 | 54 | 44 | 34 | 24 | 14 | 4 | | |
| 11 | 100 | 88 | 77 | 66 | 56 | 46 | 36 | 26 | 17 | 8 | | |
| 12 | 100 | 89 | 78 | 68 | 57 | 48 | 38 | 29 | 20 | 11 | | |
| 13 | 100 | 89 | 79 | 69 | 59 | 49 | 40 | 31 | 23 | 14 | 6 | |
| 14 | 100 | 90 | 79 | 70 | 60 | 51 | 42 | 33 | 25 | 17 | 9 | |
| 15 | 100 | 90 | 80 | 71 | 61 | 52 | 44 | 36 | 27 | 20 | 12 | 5 |
| 16 | 100 | 90 | 81 | 71 | 62 | 54 | 45 | 37 | 30 | 22 | 15 | 8 |
| 17 | 100 | 90 | 81 | 72 | 64 | 55 | 47 | 39 | 32 | 24 | 27 | 10 |
| 18 | 100 | 91 | 82 | 73 | 64 | 56 | 48 | 41 | 34 | 26 | 20 | 13 |
| 19 | 100 | 91 | 82 | 74 | 65 | 58 | 50 | 43 | 35 | 29 | 22 | 15 |
| 20 | 100 | 91 | 83 | 74 | 66 | 59 | 51 | 44 | 37 | 30 | 24 | 18 |
| 21 | 100 | 91 | 83 | 75 | 67 | 60 | 52 | 46 | 39 | 32 | 26 | 20 |
| 22 | 100 | 92 | 83 | 76 | 68 | 61 | 54 | 47 | 40 | 34 | 28 | 22 |
| 23 | 100 | 92 | 84 | 76 | 69 | 61 | 55 | 48 | 42 | 36 | 30 | 24 |
| 24 | 100 | 92 | 84 | 77 | 69 | 62 | 56 | 49 | 43 | 37 | 31 | 26 |
| 25 | 100 | 92 | 84 | 77 | 70 | 63 | 57 | 50 | 44 | 38 | 33 | 27 |

## X. Kai kurių medžiagų ilgėjimo koeficientas

| Medžiaga | $\alpha$, $\times 10^{-5}$ $K^{-1}$ | Medžiaga | $\alpha$, $\times 10^{-5}$ $K^{-1}$ |
|---|---|---|---|
| Alavas | 2,1 | Platina | 0,9 |
| Aliuminis | 2,3 | Plienas, geležis | 1,2 |
| Auksas | 1,4 | Stiklas | 0,9 |
| Cinkas | 2,9 | Švinas | 2,9 |
| Invaras | 0,06 | Varis | 1,7 |
| Ketus | 1,0 | Volframas | 0,4 |
| Nikelis | 1,28 | Žalvaris | 1,9 |

## XI. Kai kurių medžiagų tūrio plėtimosi koeficientas

| Medžiaga | $\beta$, $K^{-1}$ | Medžiaga | $\beta$, $K^{-1}$ |
|---|---|---|---|
| Acetonas | $1{,}2 \times 10^{-3}$ | Glicerinas | $5{,}0 \times 10^{-4}$ |
| Alyva (transformatorinė) | $6{,}0 \times 10^{-4}$ | Nafta | $1{,}0 \times 10^{-3}$ |
| Benzinas | $1{,}0 \times 10^{-3}$ | Sieros rūgštis | $5{,}7 \times 10^{-4}$ |
| Etilo alkoholis | $1{,}1 \times 10^{-3}$ | Vanduo (0 °C) | $1{,}8 \times 10^{-4}$ |
| Gyvsidabris | $1{,}8 \times 10^{-4}$ | Žibalas | $1{,}0 \times 10^{-3}$ |

## XII. Kai kurių medžiagų dielektrinė skvarba

| Medžiaga | $\varepsilon$ | Medžiaga | $\varepsilon$ |
|---|---|---|---|
| Alyva | 2,5 | Parafinuotas popierius | 2,0 |
| Benzinas | 2,3 | Stiklas | 6 (5–10) |
| Ebonitas | 2,7 | Vaškas | 5,8 |
| Gintaras | 2,8 | Vanduo | |
| Glicerinas | 39 | 20 °C | 81 |
| Organinis stiklas | 3,3 | 0 °C | 88 |
| Parafinas | 2,2 | Žėrutis | 6 |
| | | Žibalas | 2,1 |

## XIII. Kai kurių medžiagų savitoji varža, kai temperatūra 20 °C

| Medžiaga | $\rho$, $\times 10^{-8}$ $\Omega \cdot m$ | Medžiaga | $\rho$, $\times 10^{-8}$ $\Omega \cdot m$ |
|---|---|---|---|
| Aliuminis | 2,7 | Plienas | 12 |
| Fechralis | 110 | Sidabras | 1,6 |
| Geležis | 9,9 | Sieros rūgštis (10 %) | 2 600 000 |
| Konstantanas | 47 | Švinas | 21 |
| Manganinas | 39 | Varis | 1,68 |
| Nichromas | 105 | Volframas | 5,5 |
| Nikelinas | 42 | Žalvaris | 7,1 |

## XIV. Kai kurių medžiagų temperatūrinis varžos koeficientas

| Medžiaga | α, $K^{-1}$ | Medžiaga | α, $K^{-1}$ |
|---|---|---|---|
| Aliuminis | 0,0042 | Platina | 0,004 |
| Cinkas | 0,004 | Plienas | 0,006 |
| Fechralis | 0,0002 | Sidabras | 0,004 |
| Konstantanas | 0,000005 | Švinas | 0,0037 |
| Manganinas | 0,000008 | Varis | 0,006 |
| Nichromas | 0,0002 | Volframas | 0,005 |
| Nikelinas | 0,0001 | Žalvaris | 0,001 |

## XV. Kai kurių medžiagų elektrocheminis ekvivalentas

| Medžiaga | $k$, × $10^{-6}$ kg/C | Medžiaga | $k$, × $10^{-6}$ kg/C |
|---|---|---|---|
| Aliuminis | 0,093 | Kalis | 0,405 |
| Chloras | 0,367 | Nikelis | 0,304 |
| Chromas | 0,18 | Sidabras | 1,12 |
| Cinkas | 0,34 | Vandenilis | 0,0104 |
| Deguonis | 0,0829 | Varis | 0,33 |

## XVI. Elektrono išlaisvinimo iš kai kurių medžiagų darbas

| Medžiaga | $A$, eV | Medžiaga | $A$, eV |
|---|---|---|---|
| Bario oksidas | 1,0 | Nikelis | 4,84 |
| Cezis | 1,9 | Platina | 5,3 |
| Cinkas | 3,74 | Sidabras | 4,3 |
| Kadmis | 4,08 | Varis | 4,5 |
| Kalis | 2,2 | Volframas | 4,5 |
| Litis | 2,4 | | |

## XVII. Kai kurių medžiagų lūžio rodiklis

| Medžiaga | $n$ | Medžiaga | $n$ |
|---|---|---|---|
| Anglies disulfatas | 1,63 | Kedrų aliejus | 1,52 |
| Akmens druska | 1,54 | Kvarcas | 1,54 |
| Cukrus | 1,56 | Ledas | 1,31 |
| Deimantas | 2,4 | Oras | 1,00029 |
| Etilo alkoholis | 1,36 | Stiklas | 1,6 |
| Glicerinas | 1,47 | Vanduo | 1,33 |

## XVIII. Kai kurių elementų izotopų santykinė atominė masė

| Elementas | Izotopas | Masė, u | Elementas | Izotopas | Masė, u |
|---|---|---|---|---|---|
| Vandenilis | $^{1}_{1}H$ | 1,00783 | Deguonis | $^{16}_{8}O$ | 15,99491 |
| | $^{2}_{1}H$ | 2,01410 | | $^{17}_{8}O$ | 16,99913 |
| | $^{3}_{1}H$ | 3,01605 | Fluoras | $^{19}_{9}F$ | 18,99843 |
| Helis | $^{3}_{2}He$ | 3,01603 | Neonas | $^{20}_{10}Ne$ | 19,99244 |
| | $^{4}_{2}He$ | 4,00260 | Aliuminis | $^{27}_{13}Al$ | 26,98153 |
| Litis | $^{6}_{3}Li$ | 6,01513 | Fosforas | $^{30}_{15}P$ | 29,97867 |
| | $^{7}_{3}Li$ | 7,01601 | Kalcis | $^{40}_{20}Ca$ | 39,97542 |
| Berilis | $^{7}_{4}Be$ | 7,01916 | Kobaltas | $^{56}_{27}Co$ | 55,95769 |
| | $^{8}_{4}Be$ | 8,00531 | Gyvsidabris | $^{200}_{80}Hg$ | 200,02800 |
| | $^{9}_{4}Be$ | 9,01505 | Radonas | $^{222}_{86}Rn$ | 222,01922 |
| Boras | $^{10}_{5}B$ | 10,01294 | Radis | $^{226}_{88}Ra$ | 226,02435 |
| | $^{11}_{5}B$ | 11,00930 | Uranas | $^{235}_{92}U$ | 235,04299 |
| Anglis | $^{12}_{6}C$ | 12,00000 | | $^{238}_{92}U$ | 238,05006 |
| | $^{13}_{6}C$ | 13,00335 | | $^{239}_{92}U$ | 239,05122 |
| Azotas | $^{14}_{7}N$ | 14,00307 | Plutonis | $^{239}_{94}Pu$ | 239,05122 |

## XIX. Medžiagų trinties koeficientas

| | |
|---|---|
| Guma į betoną | 0,75 |
| Medis į medį | 0,25 |
| Oda į ketų | 0,56 |
| Plienas į ledą | 0,02 |
| Plienas į plieną | 0,20 |

## Iliustracijų šaltiniai

| | |
|---|---|
| 1 pav. (sp.), *a* | http://www.fas.harvard.edu/~scdiroff/lds/LightOptics/NewtonsRings/NewtonsRings08.jpg |
| 2 pav. (sp.), *b* | http://www.fas.harvard.edu/~scdiroff/lds/LightOptics/NewtonsRings/NewtonsRings04.jpg |
| 313 pav. | *Miakiševas G, Buchovcevas B*. Fizika. Vadovėlis XII klasei. – Kaunas: Šviesa, 1987. |
| 7 pav. (sp.) | http://solarsystem.nasa.gov/multimedia/gallery/SIRTF_Infrared.jpg |
| 8 pav. (sp.) | http://solarsystem.nasa.gov/multimedia/gallery/SIRTF_Infrared.jpg |
| 16 pav. (sp.) | http://www.planetary.org/mercury/images mercury_map_airbrush_usgs_orthographic_1800x1800.jpg |
| 353 pav. | http://www.planetary.org/mercury/images/mercury_map_airbrush_usgs_orthographic_1800x1800.jpg |
| 17 pav. (sp.) | http://photojournal.jpl.nasa.gov/tiff/PIA00104.tif |
| 354 pav. | http://photojournal.jpl.nasa.gov/tiff/PIA00271.tif |
| 19 pav. (sp.) | Photo disc |
| 355 pav. | http://grin.hq.nasa.gov/IMAGES/MEDIUM/GPN-2000-001437.jpg |
| 20 pav. (sp.) | http://photojournal.jpl.nasa.gov/tiff/PIA00405.tif |
| 356 pav. | Photo disc |
| 21 pav. (sp.) | http://www.telescopes.cc/images/moon3large.jpg |
| 22 pav. (sp.) | http://www.solarviews.com/raw/moon/earthris.jpg |
| 23 pav. (sp.) | http://www.nasa.gov/images/content/111096main_image_feature_289_ajhfull.jpg |
| 24 pav. (sp.) | http://nssdc.gsfc.nasa.gov/image/planetary/mars/marsglobe3.jpg |
| 358 pav. | http://nssdc.gsfc.nasa.gov/image/planetary/mars/marsglobe1.jpg |
| 25 pav. (sp.) | http://www.esa.int/export/externals/images/015-090204_1-0037_01-6v.jpg |
| 26 pav. (sp.) | http://www.nasa.gov/images/content/54958main_MM_image_feature_117_jwfull.jpg |
| 27 pav. (sp.) | http://sci.esa.int/science-e-media/img/f8/Phobos.tiff |
| 359 pav. | http://abbeynews.com/wp/jupiter.jpg |
| 28 pav. (sp.) | http://www.nasa.gov/images/content/68508main_image_feature_227_jwfull.jpg |
| 29 pav. (sp.) | http://photojournal.jpl.nasa.gov/tiff/PIA00600.tif |
| 30 pav. (sp.) | http://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA05982.jpg |
| 360 pav. | http://www.nasa.gov/images/content/56986main_MM_image_feature_148_jwfull.jpg |
| 31 pav. (sp.) | http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap020124.html |
| 361 pav. | http://www.solarviews.com/cap/uranus/uranus.htm |
| 32 pav. (sp.) | http://photojournal.jpl.nasa.gov/tiff/PIA02963.tif |
| 362 pav. | http://www.solarviews.com/raw/uranus/miranda2.jpg |
| 33 pav. (sp.) | http://photojournal.jpl.nasa.gov/tiff/PIA01492.tif |
| 363 pav. | http://grin.hq.nasa.gov/IMAGES/LARGE/GPN-2000-000443.jpg |
| 34 pav. (sp.) | http://www.aip.de/~gallery/solar_system/Neptune/ringe.jpg |
| 35 pav. (sp.) | http://photojournal.jpl.nasa.gov/tiff/PIA00119.tif |
| 364 pav. | *Straižys V*. Astronomija. Bandomoji mokomoji knyga XII klasei. – Kaunas: Šviesa, 1993. |
| 37 pav. (sp.) | http://portail.imcce.fr/en/presentation/equipes/GAP/membres/JV/images/Meteor_Crater/0003.jpg |
| 38 pav. (sp.) | http://www.astroarts.jp/gallery/meteor/leo/2001leo/1/image/tago.jpg |
| 39 pav. (sp.) | http://www.solarviews.com/raw/comet/west2.jpg |
| 42 pav. (sp.) | http://bass2000.obspm.fr/albums/album30/gband.sized.jpg |
| 43 pav. (sp.), *a* | http://www.nasa.gov/images/content/52985main_MM_image_feature_94_jwhires.jpg |
| 43 pav. (sp.), *b* | http://www.astro.su.se/~alexis/images/SunSpot.jpg |
| 44 pav. (sp.) | http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/image/0211/sunspot_swedish_c1.jpg |
| 45 pav. (sp.) | http://www.astro.uwo.ca/~jlandstr/planets/webfigs/sun/images/4094_eclipse.jpg |
| 46 pav. (sp.) | http://www.nasa.gov/images/content/66677main_image_feature_221_jwfull.jpg |
| 47 pav. (sp.) | http://iconcreator.homestead.com/files/supernova.jpg |
| 48 pav. (sp.) | http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-1999/phot-40f-99-hires.jpg |
| 49 pav. (sp.) | http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/image/0301/horsehead_tan_big.jpg |
| 50 pav. (sp.) | http://www.ifa.hawaii.edu/~wang/gallery/picutres/summer_mw-2003-median.jpg |
| 51 pav. (sp.), *a* | http://www.astro.princeton.edu/~rhl/PrettyPictures/M5.jpg |
| 51 pav. (sp.), *b* | http://www.seds.org/messier/Pics/Hi-res/m67no_hi.jpg |
| 52 pav. (sp.) | http://www.nasa.gov/images/content/57329main_MM_image_feature_151_jwfull.jpg |
| 53 pav. (sp.), *a* | http://www.hiddenloft.darkhorizons.org/images/M20afull.jpg |
| 53 pav. (sp.), *b* | http://www.ifa.hawaii.edu/~wang/gallery/picutres/m45-2003.JPG |
| 54 pav. (sp.), *a* | http://www.noao.edu/outreach/aop/observers/n205block.jpg |
| 54 pav. (sp.), *b* | http://www.robgendlerastropics.com/M31New5.jpg |
| 54 pav. (sp.), *c* | http://www.ifa.hawaii.edu/~wang/gallery/picutres/LMC.jpg |
| 55 pav. (sp.) | http://www.nasa.gov/images/content/56533main_MM_image_feature_142_jwfull.jpg |

# PERIODINĖ ELE

SANTYKINĖ ATOMINĖ MASĖ — 35,453
OKSIDACIJOS LAIPSNIS — −1 +1 +3 +5 +7
SIMBOLIS — Cl
PAVADINIMAS — CHLORAS
ATOMINIS SKAIČIUS — 17

PEREINAMIEJI ELEM

| PERIODAI | GRUPĖS IA 1 | IIA 2 | IIIB 3 | IVB 4 | VB 5 | VIB 6 | VIIB 7 | VIIIB 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1,00794 H +1 −1 VANDENILIS 1 | | | | | | | | |
| 2 | 6,941 Li +1 LITIS 3 | 9,01218 Be +2 BERILIS 4 | | | | | | | |
| 3 | 22,98977 Na +1 NATRIS 11 | 24,305 Mg +2 MAGNIS 12 | | | | | | | |
| 4 | 39,0983 K +1 KALIS 19 | 40,08 Ca +2 KALCIS 20 | 44,9559 Sc +3 SKANDIS 21 | 47,88 Ti +2 +3 +4 TITANAS 22 | 50,9415 V +2 +3 +4 +5 VANADIS 23 | 51,996 Cr +2 +3 +6 CHROMAS 24 | 54,9380 Mn +2 +3 +4 +7 MANGANAS 25 | 55,847 Fe +2 +3 GELEŽIS 26 | 58,9332 Co +2 +3 KOBALTAS 27 |
| 5 | 85,4678 Rb +1 RUBIDIS 37 | 87,62 Sr +2 STRONCIS 38 | 88,9059 Y +3 ITRIS 39 | 91,224 Zr +4 CIRKONIS 40 | 92,9064 Nb +3 +5 NIOBIS 41 | 95,94 Mo +3 +6 MOLIBDENAS 42 | (98) Tc +4 +6 +7 TECHNECIS 43 | 101,07 Ru +3 RUTENIS 44 | 102,906 Rh +3 RODIS 45 |
| 6 | 132,905 Cs +1 CEZIS 55 | 137,33 Ba +2 BARIS 56 | La-Lu 57–71 | 178,49 Hf +4 HAFNIS 72 | 180,948 Ta +5 TANTALAS 73 | 183,85 W +6 VOLFRAMAS 74 | 186,207 Re +4 +6 +7 RENIS 75 | 190,2 Os +3 +4 OSMIS 76 | 192,22 Ir +3 +4 IRIDIS 77 |
| 7 | (223) Fr +1 FRANCIS 87 | 226,025 Ra +2 RADIS 88 | Ac-Lr 89–103 | (261) Rf REZERFORDIS 104 | (262) Db DUBNIS 105 | (263) Sg SIBORGIS 106 | (264) Bh BORIS 107 | (277) Hs HASIS 108 | (268) Mt MEITNERIS 109 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| LANTANOIDAI | 138,906 La +3 LANTANAS 57 | 140,12 Ce +3 +4 CERIS 58 | 140,908 Pr +3 PRAZEODIMIS 59 | 144,24 Nd +3 NEODIMIS 60 | (145) Pm +3 PROMETIS 61 | 150,36 Sm +2 +3 SAMARIS 62 |
| AKTINOIDAI | (227) Ac +3 AKTINIS 89 | 232,038 Th +4 TORIS 90 | 231,036 Pa +4 +5 PROTAKTINIS 91 | 238,029 U +3 +4 +5 +6 URANAS 92 | 237,048 Np +3 +4 +5 +6 NEPTŪNIS 93 | (244) Pu +3 +4 +5 +6 PLUTONIS 94 |

# MENTŲ LENTELĖ

ENTAI

GRUPĖS

| 10 | IB<br>11 | IIB<br>12 | IIIA<br>13 | IVA<br>14 | VA<br>15 | VIA<br>16 | VIIA<br>17 | VIIIA<br>18 | PERIODAI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | 4,00260<br>He 0<br>HELIS<br>2 | 1 |
| | | | 10,81<br>B +3<br>BORAS<br>5 | 12,0111<br>C −4 +2 +4<br>ANGLIS<br>6 | 14,0067<br>N −3 −2 −1 +1 +2 +3 +4 +5<br>AZOTAS<br>7 | 15,9994<br>O −2<br>DEGUONIS<br>8 | 18,998403<br>F −1<br>FLUORAS<br>9 | 20,179<br>Ne 0<br>NEONAS<br>10 | 2 |
| | | | 26,98154<br>Al +3<br>ALIUMINIS<br>13 | 28,0855<br>Si −4 +2 +4<br>SILICIS<br>14 | 30,97376<br>P −3 +3 +5<br>FOSFORAS<br>15 | 32,06<br>S −2 +4 +6<br>SIERA<br>16 | 35,453<br>Cl −1 +1 +3 +5 +7<br>CHLORAS<br>17 | 39,948<br>Ar 0<br>ARGONAS<br>18 | 3 |
| 58,69<br>Ni +2 +3<br>NIKELIS<br>28 | 63,546<br>Cu +1 +2<br>VARIS<br>29 | 65,39<br>Zn +2<br>CINKAS<br>30 | 69,72<br>Ga +3<br>GALIS<br>31 | 72,59<br>Ge +2 +4<br>GERMANIS<br>32 | 74,9216<br>As −3 +3 +5<br>ARSENAS<br>33 | 78,96<br>Se +4 +6<br>SELENAS<br>34 | 79,904<br>Br −1 +1 +5<br>BROMAS<br>35 | 83,80<br>Kr 0 +2<br>KRIPTONAS<br>36 | 4 |
| 106,42<br>Pd +2 +4<br>PALADIS<br>46 | 107,868<br>Ag +1<br>SIDABRAS<br>47 | 112,41<br>Cd +2<br>KADMIS<br>48 | 114,82<br>In +3<br>INDIS<br>49 | 118,71<br>Sn +2 +4<br>ALAVAS<br>50 | 121,75<br>Sb −3 +3 +5<br>STIBIS<br>51 | 127,60<br>Te −2 +4 +6<br>TELŪRAS<br>52 | 126,905<br>I −1 +1 +5 +7<br>JODAS<br>53 | 131,29<br>Xe 0 +2 +4 +6<br>KSENONAS<br>54 | 5 |
| 195,08<br>Pt +2 +4<br>PLATINA<br>78 | 196,967<br>Au +1 +3<br>AUKSAS<br>79 | 200,59<br>Hg +1 +2<br>GYVSIDABRIS<br>80 | 204,383<br>Tl +1 +3<br>TALIS<br>81 | 207,2<br>Pb +2 +4<br>ŠVINAS<br>82 | 208,980<br>Bi +3 +5<br>BISMUTAS<br>83 | (209)<br>Po +2 +4<br>POLONIS<br>84 | (210)<br>At<br>ASTATAS<br>85 | (222)<br>Rn 0<br>RADONAS<br>86 | 6 |
| (281)<br>Ds<br>DARMŠTATIS<br>110 | (263)<br>Rg<br>RENTGENIS<br>111 | (285)<br>112 | | (289)<br>114 | | | | | 7 |

MASĖS SKLIAUSTELIUOSE – BENDRA PATVARIŲ IZOTOPŲ MASĖ

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 151,96<br>Eu +2 +3<br>EUROPIS<br>63 | 157,25<br>Gd +3<br>GADOLINIS<br>64 | 158,925<br>Tb +3<br>TERBIS<br>65 | 162,50<br>Dy +3<br>DISPROZIS<br>66 | 164,930<br>Ho +3<br>HOLMIS<br>67 | 167,26<br>Er +3<br>ERBIS<br>68 | 168,934<br>Tm +3<br>TULIS<br>69 | 173,04<br>Yb +2 +3<br>ITERBIS<br>70 | 174,967<br>Lu +3<br>LIUTECIS<br>71 |
| (243)<br>Am +3 +4 +5 +6<br>AMERICIS<br>95 | (247)<br>Cm +3<br>KIURIS<br>96 | (247)<br>Bk +3 +4<br>BERKLIS<br>97 | (251)<br>Cf +3<br>KALIFORNIS<br>98 | (252)<br>Es<br>EINŠTEINIS<br>99 | (257)<br>Fm<br>FERMIS<br>100 | (258)<br>Md<br>MENDELEVIS<br>101 | (259)<br>No<br>NOBELIS<br>102 | (262)<br>Lr<br>LORENSIS<br>103 |

**Palubinskienė, Vanda**

Pa156 Fizika: vadovėlis XI–XII klasei: suaugusiųjų ir savarankiškam mokymuisi: antroji knyga / Vanda Palubinskienė. – Kaunas: Šviesa, 2005. – 215 p.: iliustr.

ISBN 5-430-04043-6

Šioje, antrojoje, vadovėlio dalyje nagrinėjamos šios fizikos kurso dalys: elektrodinamika, optika, kvantinė fizika. Atskirai pateikiama Einšteino reliatyvumo teorija. Vadovėlis baigiamas fundamentalia astronomijos medžiaga.

Medžiaga dėstoma taip, kad būtų galima mokytis neakivaizdiniu būdu. Po kiekvienos temos pateikiami praktiniai klausimai ir užduotys, kurių atsakymai yra knygos gale. Čia rasite ir įvairius priedus: pagrindines sąvokas, konstantas ir jų išvestinius dydžius, fizikinių dydžių lenteles.

Leidinys pravers ir kitose mokymosi įstaigose besimokantiems, galės būti papildoma mokomoji knyga visiems, kurie rengiasi fizikos egzaminui.

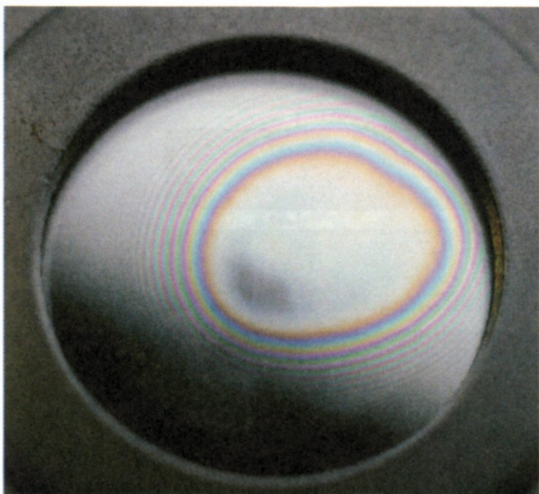
UDK 53(075.3)



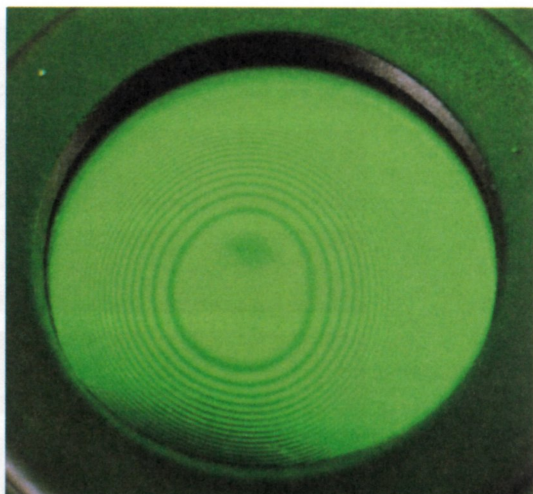
**Vanda Palubinskienė**
**FIZIKA**
Vadovėlis XI–XII klasei
Suaugusiųjų ir savarankiškam mokymuisi
Antroji knyga

Dailininkas *Elvis Zovė*
Redaktorė *Elvyra Žurauskienė*
Viršelis *Rūtos Deltuvaitės*

Tir. 2000 egz. Leid Nr. 15 727. Užsak. Nr. 5.1018.
Uždaroji akcinė bendrovė leidykla „Šviesa“, Vytauto pr. 25, LT-44352 Kaunas.
El. p. mail@sviesa.lt
Interneto puslapis http://www.sviesa.lt
Spausdino AB spaustuvė „Spindulys“, Gedimino g. 10, LT-44318 Kaunas.
El. p. spaustuve@spindulys.lt
Interneto puslapis http://www.spindulys.lt
Sutartinė kaina

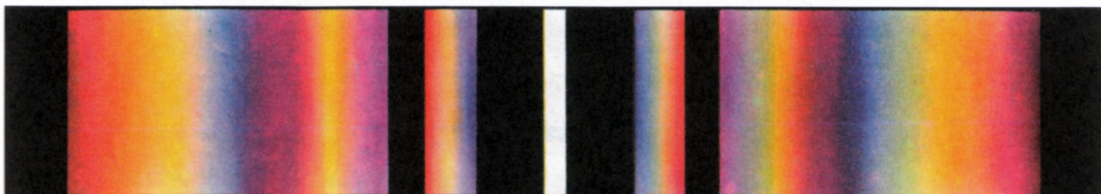


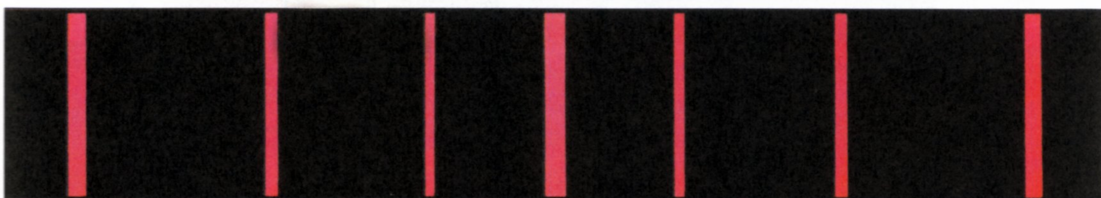
*a*



*b*

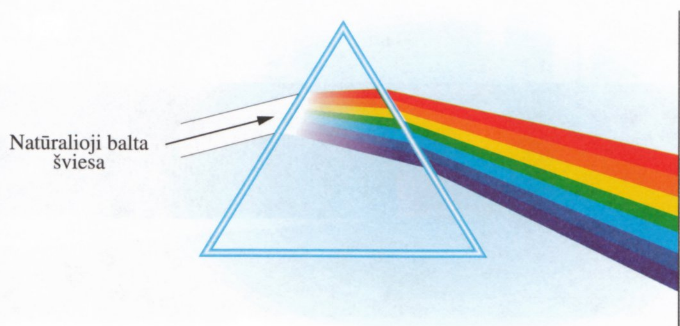
**1 pav.**







**2 pav.**




**3 pav.**

Ištisinis 1

Natrio 2

Cezio 3

Vandenilio 4

Deguonies 5

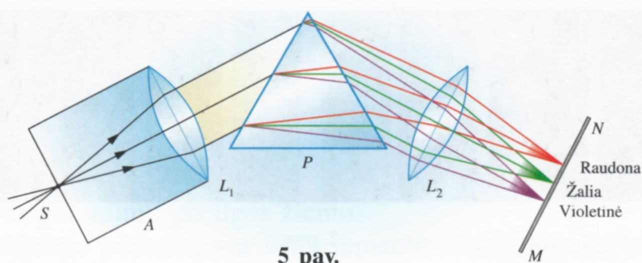
Natrio 6

Cezio 7

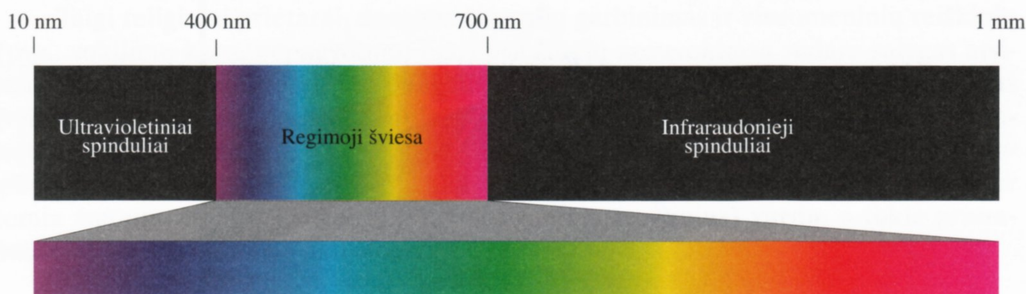
Chlorofilo 8

Saulės 9

**4 pav.** Įvairūs spektrai



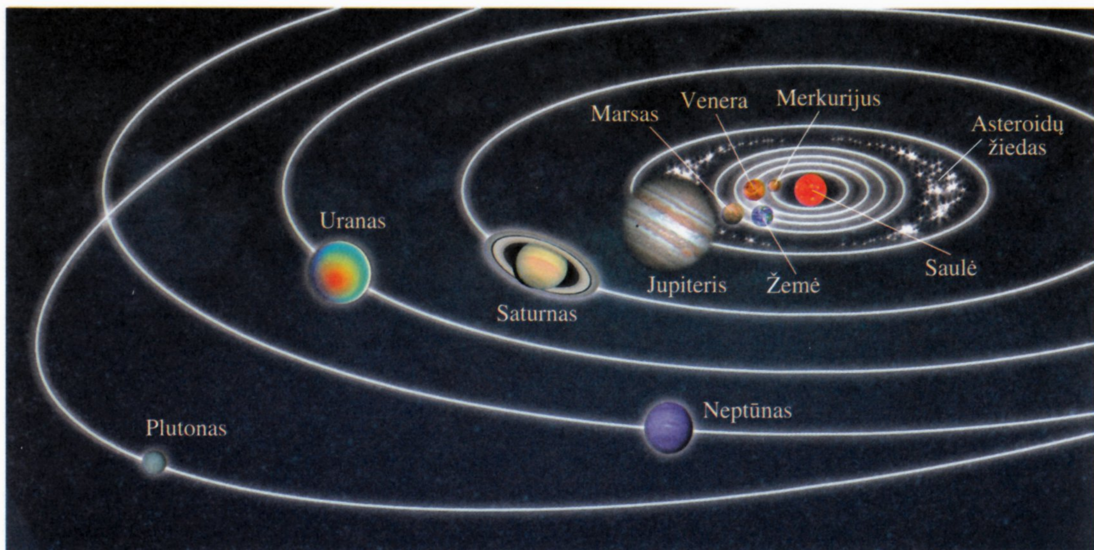

**5 pav.**



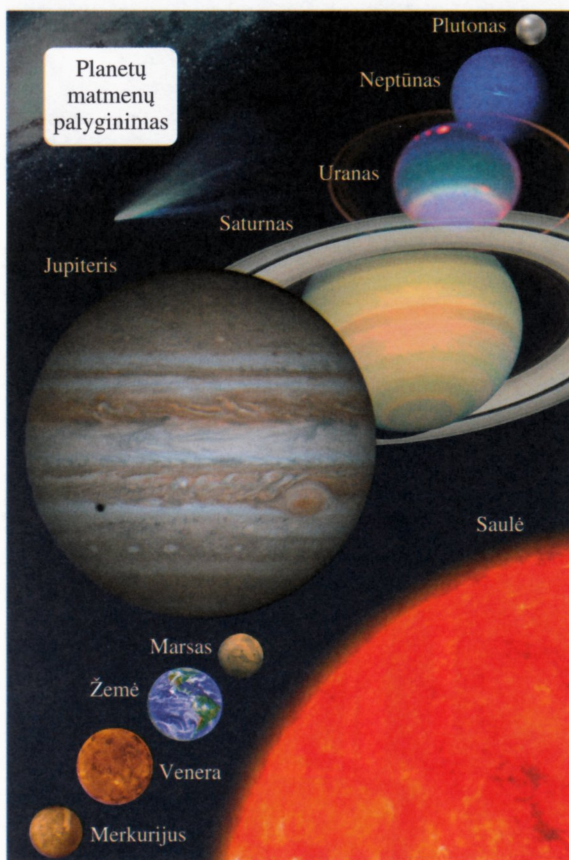

**6 pav.**

7 pav.

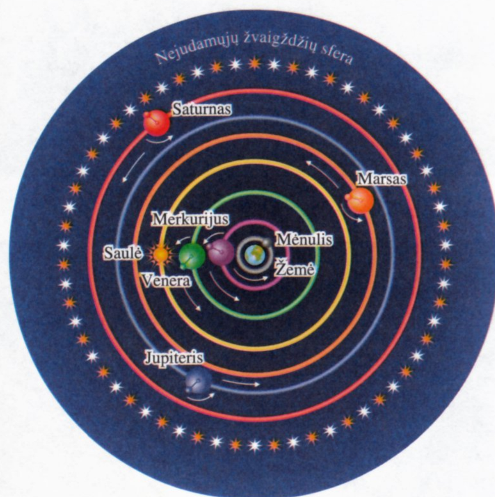
8 pav.




*a*

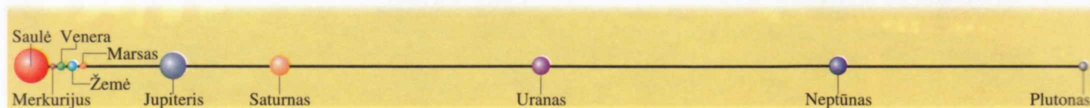



*b*

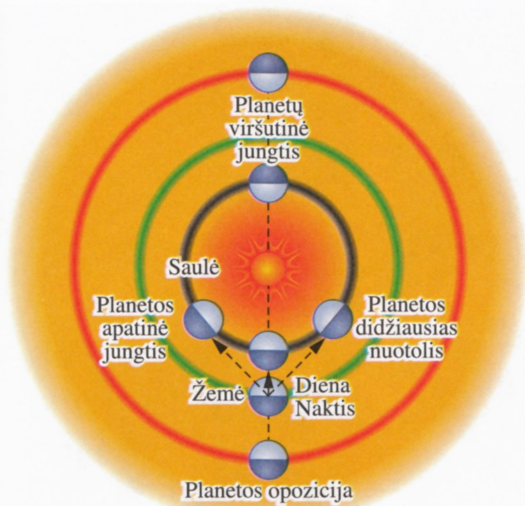



**9 pav.**

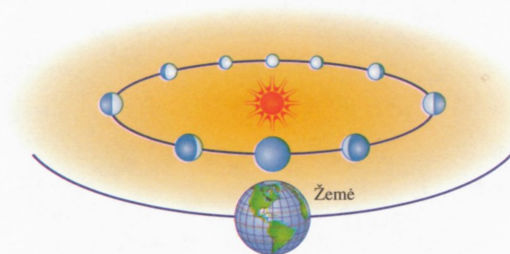
**10 pav.**



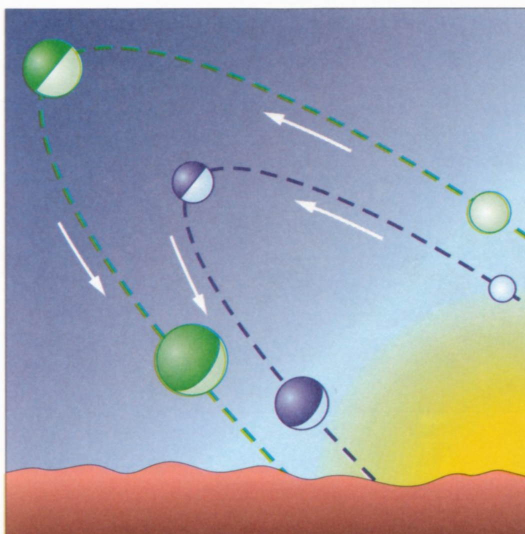

*c*



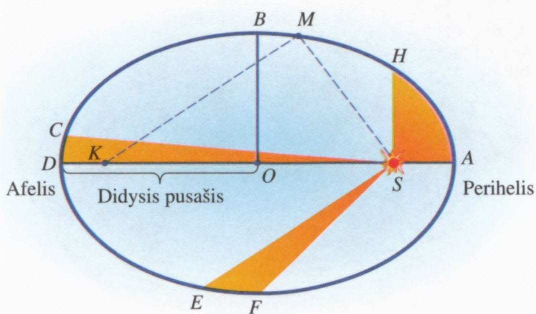

11 pav.



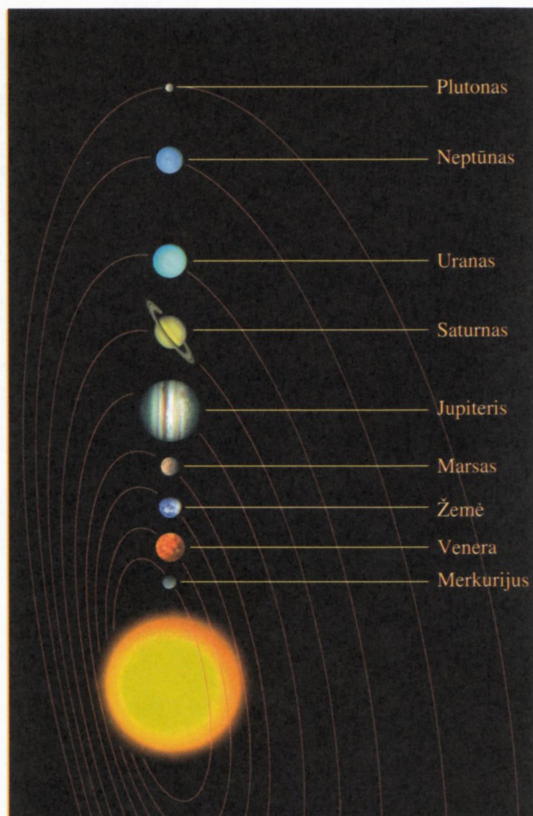

12 pav.



**13 pav.** Merkurijaus ir Veneros padėtis horizonto atžvilgiu, Saulei leidžiantis




14 pav.



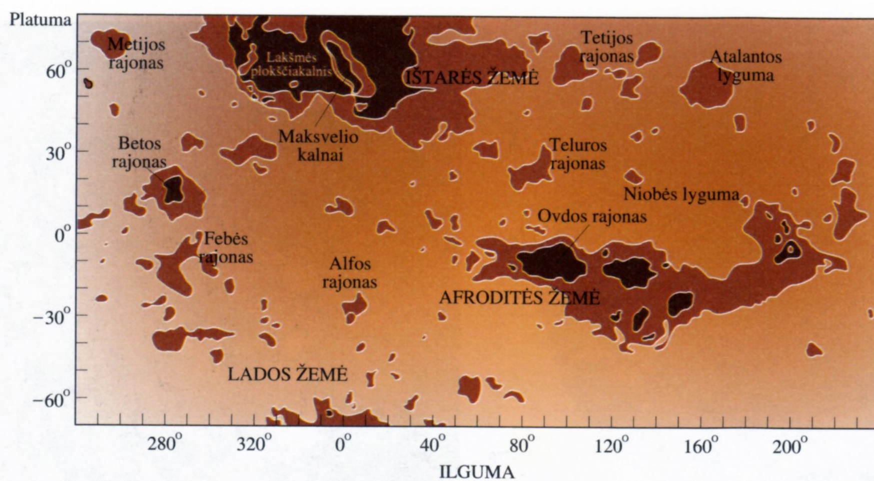

15 pav.



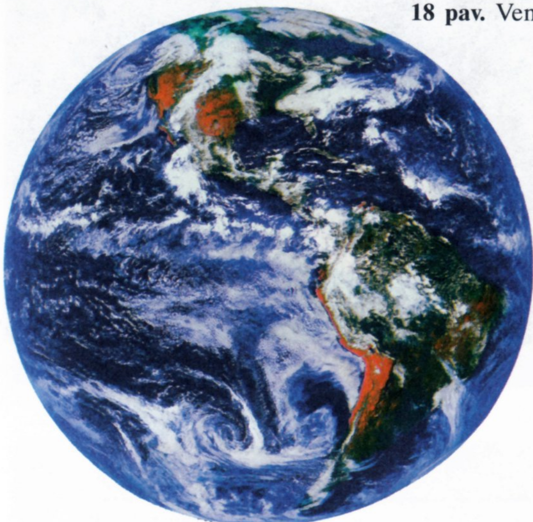
**16 pav.** Merkurijus



**17 pav.** Venera




**18 pav.** Veneros žemėlapis



**19 pav.** Žemė



**20 pav.** Mėnulis



**21 pav.** Mėnulio krateriai



**22 pav.** Žemė Mėnulio danguje

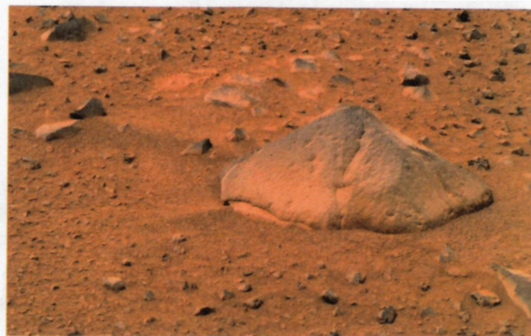
**23 pav.** Astronautas Mėnulyje



**24 pav.** Marsas



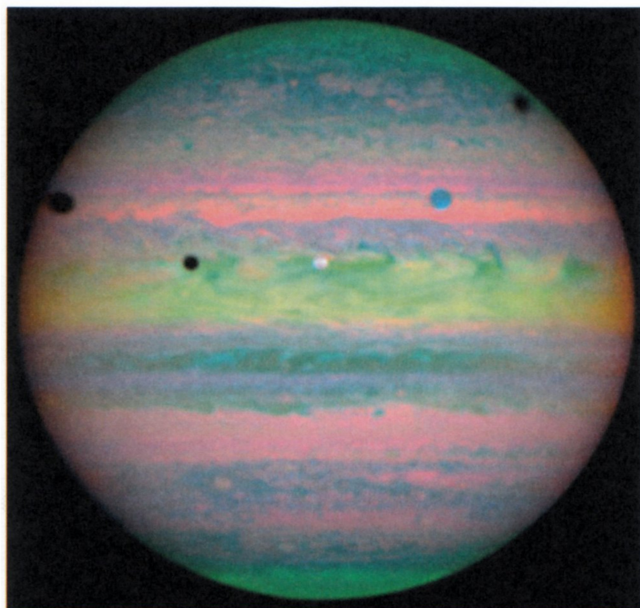
**25 pav.** Marso nuotrauka iš orbitos



**26 pav.** Marso paviršius



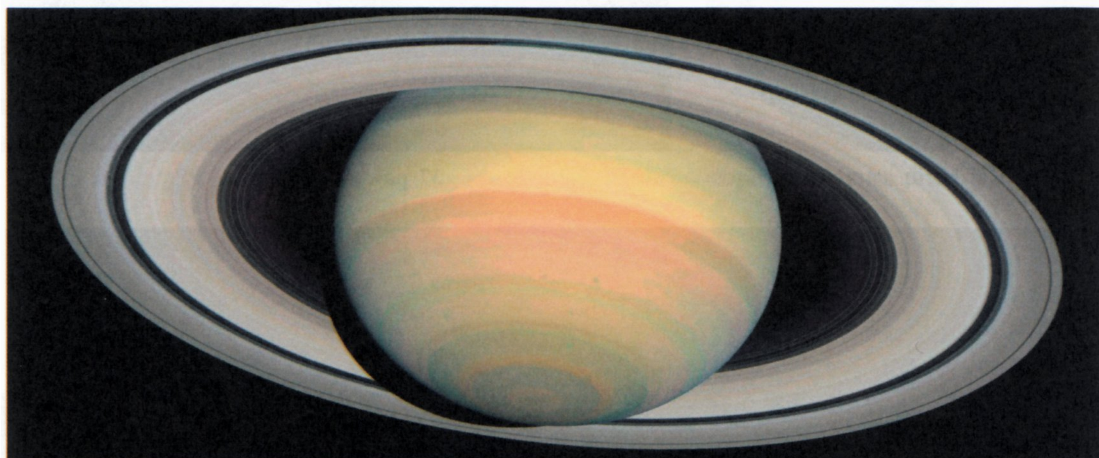
**27 pav.** Marso palydovas Fobas



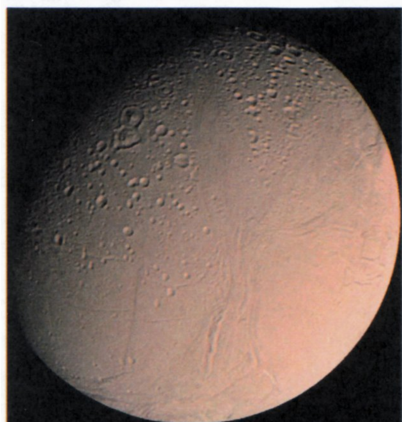
**28 pav.** Jupiteris



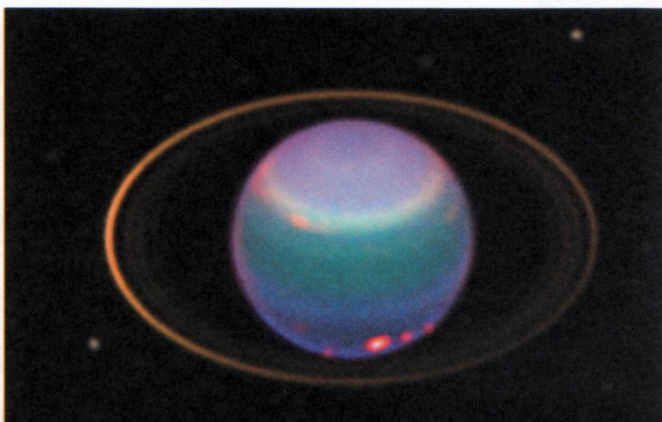
**29 pav.** Keturi didieji Jupiterio palydovai



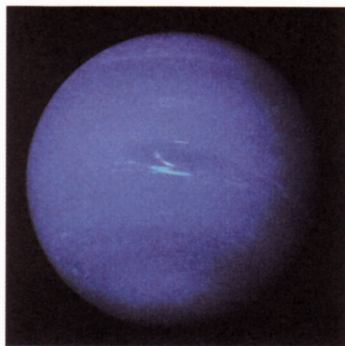
**30 pav.** Saturnas



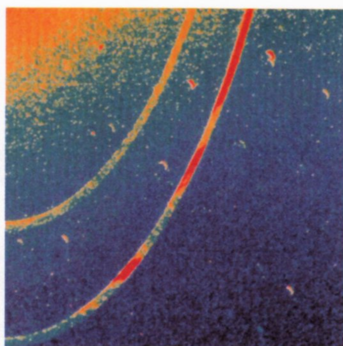
**31 pav.** Vienas Saturno palydovų Enceladas



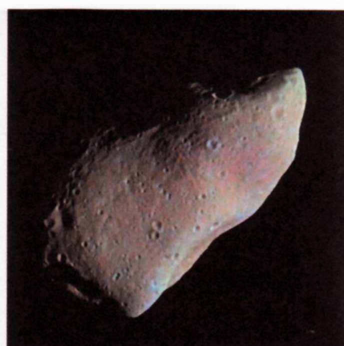
**32 pav.** Uranas



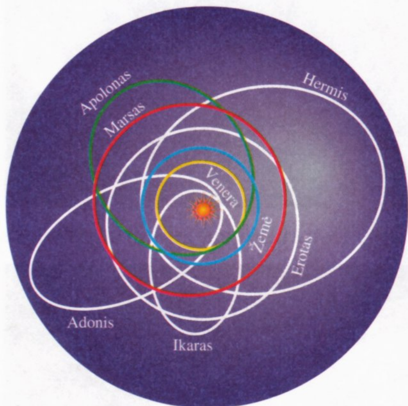
**33 pav.** Neptūnas



**34 pav.** Neptūno žiedai



**35 pav.** Asteroidas Gaspra




**36 pav.** Kai kurių asteroidų orbitos

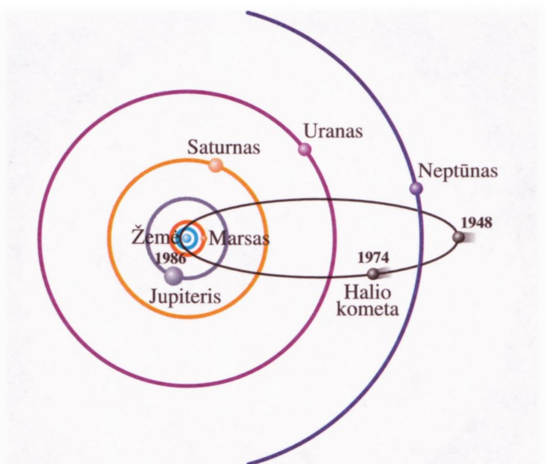


**37 pav.** Astroblema

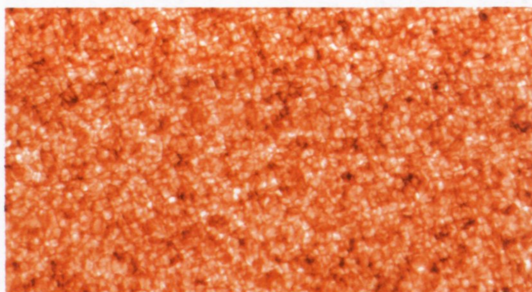
**38 pav.** Meteorų lietus



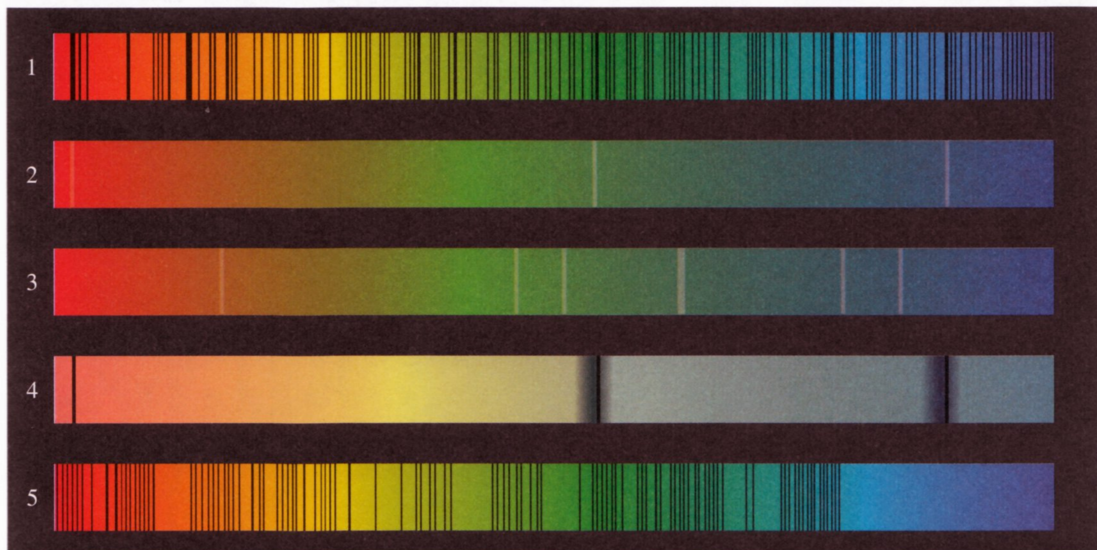
**39 pav.** Kometa



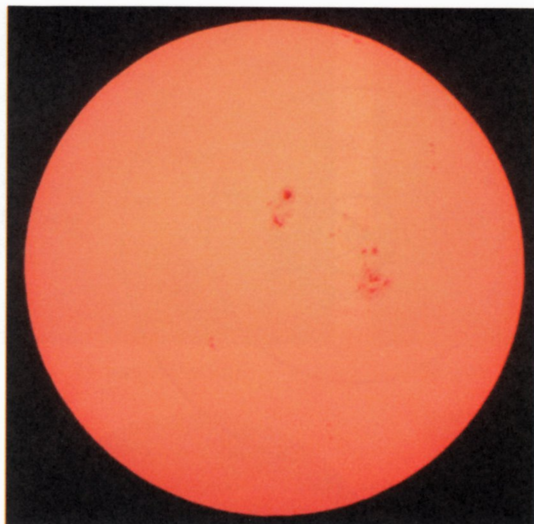

**40 pav.** Halio kometos orbita



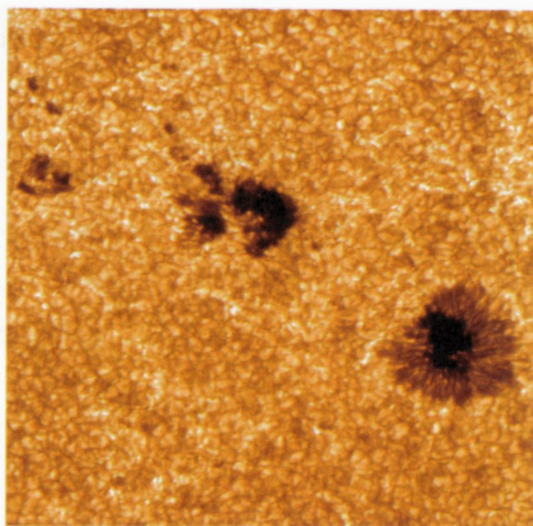
**42 pav.** Saulės granulės




**41 pav.** Spektrai: *1* – Saulės, *2* – vandenilio, *3* – helio, *4* – Sirijaus, *5* – Betelgeizės

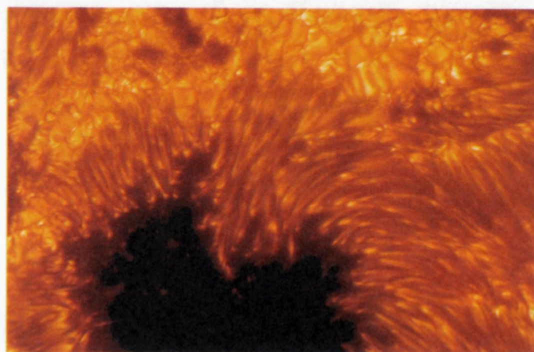


*a*

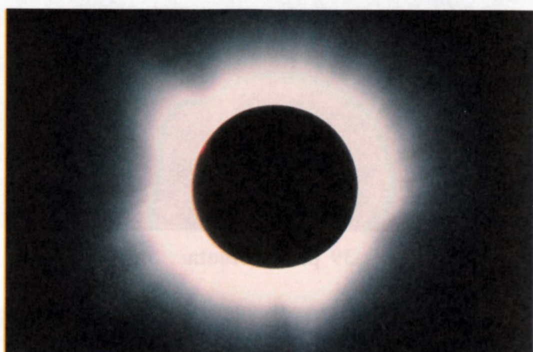


*b*

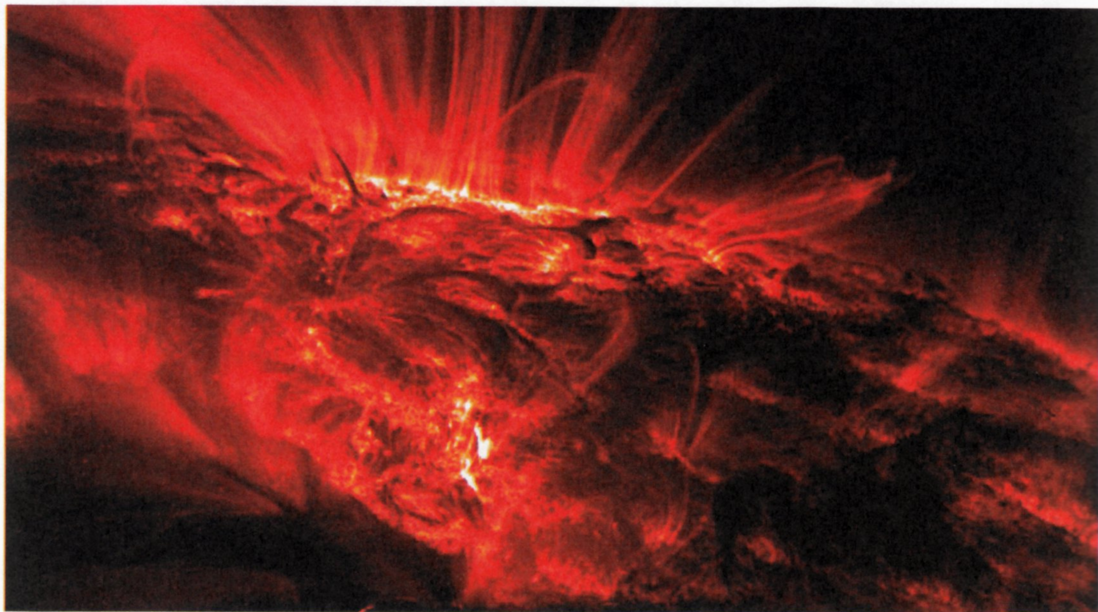
**43 pav.** Saulės dėmės



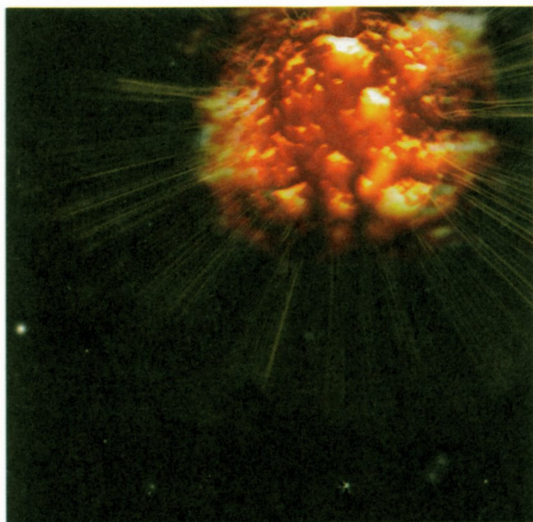
**44 pav.** Saulės spikulės



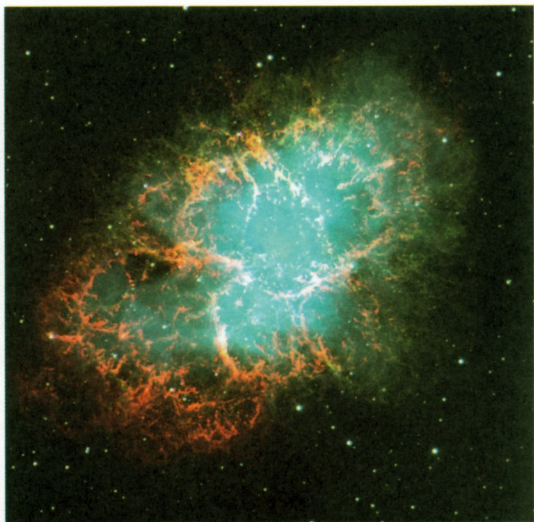
**45 pav.** Saulės vainikas visiško užtemimo metu



**46 pav.** Saulės aktyvumo kitimo reiškiniai



**47 pav.** Heraklio novos sprogimas



**48 pav.** Krabo ūkas

**49 pav.** Arklio Galvos tamsusis ūkas Šienpjovių žvaigždyne

**50 pav.** Paukščių takas



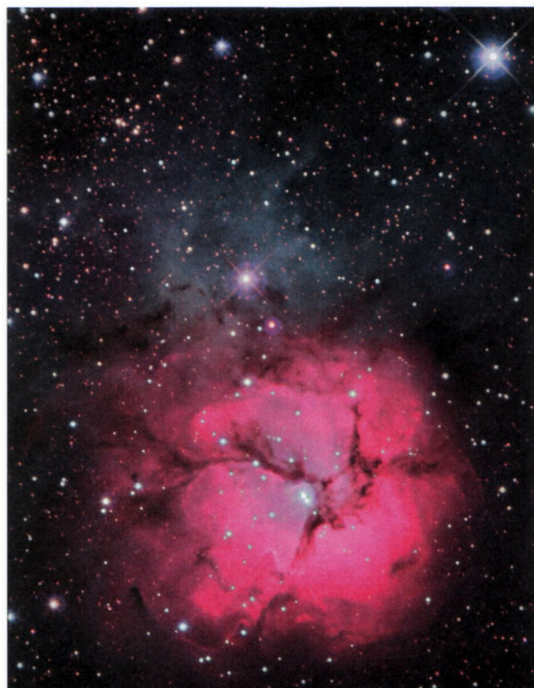
*a*



*b*

**51 pav.** Žvaigždžių spiečiai

**52 pav.** Tarpžvaigždinė medžiaga



*a*



*b*

**53 pav.** Tarpžvaigždinių dulkių debesys



*a*



*c*



*b*

**54 pav.** Įvairios galaktikos

**55 pav.** Galaktikų spiečius

Nors vadovėlis skiriamas suaugusiųjų ir savarankiškam mokymuisi, jame pateikiama medžiaga atitinka bendrojo lavinimo vidurinės mokyklos fizikos programą.

Šioje, antrojoje, knygoje toliau nagrinėjamos elektrodinamikos kurso temos: kintamoji elektros srovė, jos savybės, elektromagnetiniai virpesiai ir bangos. Atskirai pateikiama Einšteino reliatyvumo teorija. Daug dėmesio skiriama svarbiai fizikos sričiai – optikai. Aptarus spinduliavimo ir spektrinės analizės klausimus, pereinama prie šiuolaikiškiausios srities – kvantinės fizikos. Vadovėlis baigiamas astronomijos pagrindais.

Medžiaga dėstoma taip, kad būtų galima mokytis ir neakivaizdiniu būdu. Po kiekvienos temos pateikiami praktiniai klausimai ir užduotys, kurių atsakymai yra knygos gale. Čia yra ir įvairių priedų: pagrindinės sąvokos, konstantos ir jų išvestiniai dydžiai, fizikinių dydžių lentelės.

Leidinys pravers ir kitose mokymosi įstaigose besimokantiems, galės būti papildoma mokomoji knyga visiems, kurie rengiasi fizikos egzaminui.

ISBN 5-430-04043-6

